



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

ESTUDIO AMBIENTAL DEL LITORAL BESÒS: INDICADORES AMBIENTALES

Treball realitzat per:

Adrián Tardío Canito

Dirigit per:

Joan de Pablo Ribas

Ricard Giné Garriga

Màster en:

Màster en Ciència i Tecnologia de la Sostenibilitat

Barcelona, 13 de juny de 2018

Departament d'enginyeria química

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agradecimientos

Tras mi proceso de aprendizaje durante el Máster en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad, cierro una gran etapa de mi vida. Una etapa en la que ha sido rica en aprendizaje académico, cultural y de reflexión. Una experiencia en la que empezamos todos nosotros con diferentes estudios y diferentes puntos de visto y acabamos formando una familia multidisciplinar y multicultural.

Quiero también agradecer el compromiso de mis dos directores de esta tesis: Joan De Pablo y Ricard Giné. Valoro mucho su esfuerzo por el apoyo y el interés mostrado.

Por último quiero agradecer a mi familia y a mis amigos por esa paciencia que han tenido conmigo cuando los resultados en ocasiones no eran los esperados.

“Si hay una causa de profunda concienciación, hay también una causa para la esperanza. Deliberadamente, limitando el crecimiento sería difícil pero no imposible. La manera para proceder es clara y los pasos necesarios, aunque nuevos para la sociedad, están dentro de las capacidades humanas. El ser humano tiene todo lo necesario para crear una nueva forma de sociedad humana, una sociedad humana preparada para durar durante generaciones.”

Donella H. Meadows

Resumen

En base a los datos obtenidos a lo largo de la desembocadura del Besòs y del propio litoral marítimo, se estudia la calidad ambiental del agua, aire, y su estado trófico. Para ello, se ha realizado un análisis histórico y geográfico de la zona teniendo en cuenta la industrialización y el impacto que supuso; obtención de datos fisicoquímicos del agua, aire y obtención de registros de clorofila. Se crearon indicadores ambientales mediante el marco Estado-Presión-Respuesta con el fin de realizar un estudio de la calidad ambiental de la zona. Finalmente se aplicaron los indicadores a diferentes años para evaluar la evolución temporal de la presión, estado y respuesta del sistema.

Palabras clave

Indicador ambiental, PSR, sostenibilidad, río Besòs, litoral Besòs.

Abstract

Using baseline data obtained along the river and its maritime coastline, it is studied the environmental quality of the air, water, and trophic state. This implies an historical and geographical analysis of the area taking into account industrialization and its impact; physicochemical data collection about water, air and data collection about aquatic macro-invertebrates. Indicators were developed through the Pressure-State-Response (PSR) for the purpose of performing a study of environmental quality. Lastly, the indicators were applied in different years to evaluate the evolution of the pressure, state and response of the system over time.

Keywords

Environmental indicator, PSR, sustainability, Besòs River, Coast Besòs.

Índice

Agradecimientos	A
Resumen.....	C
Palabras clave.....	C
Abstract	C
Keywords.....	C
1. Introducción	1
1.1. Calidad del Agua.....	4
1.1.1. Amonio	6
1.1.2. Cloro	6
1.1.3. Fósforo	7
1.1.4. Nitrito y nitrato.....	7
1.1.5. Sodio.....	7
1.1.6. Sólidos disueltos totales.....	8
1.2. Contaminación del aire	8
1.2.1. SO ₂	9
1.2.2. NO y NO ₂	10
1.2.3. O ₃	11
1.2.4. CO	11
1.3. Estado trófico	12
1.3.1. Clorofila-a como indicador del estado trófico en el agua	12
1.4. Indicadores ambientales	13
1.4.1. Presión-Estado-Respuesta (PSR)	14
2. Caso de Estudio: El litoral del río Besòs	15
2.1. Contexto histórico	15
2.1.1. Industrialización	16
2.2. Datos básicos del espacio Litoral Besòs	17
2.3. Catástrofes del Besòs, “Besossades”	18
2.4. Marco económico del Litoral	18
2.5. Marco urbanístico del Litoral del Besòs	19
2.5.1. El frente del Litoral del Besòs.....	19
2.5.2. La recuperación de los tramos finales del río Besòs, Parc Fluvial del Besòs.....	19
2.5.3. Iniciación de un nuevo proyecto de reforma sostenible del litoral del Besòs, PECT	20
3. Objetivos	20
3.1. Objetivo general.....	20

3.2.	Objetivos específicos.....	21
4.	Metodología	21
4.1.	Caso de Estudio: EL litoral del río Besòs.....	21
4.2.	Base de datos	22
4.3.	Análisis de los datos extraídos	23
4.4.	Indicadores ambientales	23
4.4.1.	La presión del sistema	26
4.4.2.	El estado del sistema	26
4.4.3.	La respuesta del sistema	29
4.5.	Índices ambientales.....	30
5.	Resultados	31
5.1.	Tendencia temporal de los datos extraídos	31
5.1.1.	Contaminantes hidrológicos del litoral	31
5.1.2.	Contaminantes hidrológicos del río	33
5.1.3.	Contaminantes hidrológicos subterráneos	34
5.1.4.	Contaminantes del aire	35
5.1.5.	Estado trófico	38
5.2.	Análisis geográfico de los datos extraídos	38
5.2.1.	Contaminación del agua.....	39
5.2.2.	Contaminación del aire	44
5.2.3.	El estado trófico	45
5.3.	Las presiones del sistema (2008-2011)	46
5.3.1.	Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea	46
5.3.2.	Indicadores de contaminación del aire	48
5.3.3.	Indicador clorofila-a	49
5.4.	El estado del sistema (2011)	50
5.4.1.	Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea	50
5.4.2.	Indicadores de contaminación del aire	51
5.4.3.	Indicador clorofila-a	52
5.5.	Las respuestas de sistema (2011)	52
5.5.1.	Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea	53
5.5.2.	Indicadores de contaminación del aire	54
5.5.3.	Indicador clorofila-a	54
5.6.	Indicadores agregados de calidad ambiental.....	55

5.6.1.	Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea	56
5.6.2.	Indicadores de contaminación del aire	57
5.6.3.	Indicador clorofila-a	59
5.7.	Evolución temporal: comparativa entre el período 2008-2011 y el período 2014-2017	60
5.7.1.	Indicadores de contaminación hidrológica del río y del aire	60
5.7.2.	Índices ambientales.....	62
6.	Discusión	64
6.1.	Tendencia temporal y análisis geográfico de los datos extraídos.....	64
6.2.	Las presiones, estados y respuestas del sistema (2008-2011).....	65
6.3.	Indicadores agregados de calidad ambiental.....	66
7.	Conclusiones.....	67
7.1.	Trabajo futuro	68
8.	Bibliografía	69
ANEXO I:	Análisis histórico y geográfico de la contaminación de agua	75
	Litoral Besòs	76
	Río Besòs	79
ANEXO II:	Análisis histórico y geográfico de contaminación del aire.....	81
	Estación B15	84
	Estación B16	86
	Estación B14	88
	Estación B17	90
	Estación B13	92
	Estación B12	94
ANEXO III:	Análisis histórico y geográfico del estado trófico	96
ANEXO IV:	Marco social del Besòs. Ciudad Jubilada.	102
ANEXO V:	Indicadores ambientales	103

Índice de tablas y figuras

Tabla 1.	Objetivos de Desarrollo Sostenible aplicables a esta tesis.....	2
Figura 1	(a) PSR; (b) DSR y (c) DPSIR.....	14
Figura 2.	Objeto de estudio de la zona del Besòs.	22
Tabla 2.	Estaciones y variables químicas de cada indicador.	23
Tabla 3.	Indicadores y parámetros del índice sostenible.	24
Figura 3.	Diagrama relacional de PSR.....	25

Tabla 4. Ponderación del parámetro presión.....	26
Tabla 5. Descripción de los parámetros hidrológicos, niveles y ponderaciones.....	27
Tabla 6. Límite del valor de contaminante establecido por la Real Decreto 102/2011.....	28
Tabla 7. Descripción de los parámetros del aire, niveles y ponderaciones.	29
Tabla 8. Niveles y ponderaciones de los parámetros biológicos [77].	29
Tabla 9. Ponderación del parámetro respuesta.....	30
Figura 4. Histórico de los contaminantes hidrológicos del litoral del Besòs. Imagen superior izquierda: Amonio (mg/L). Imagen superior derecha: Fosfatos (mg/L). Imagen inferior izquierda Nitratos (mg/L). Imagen inferior derecha: Nitritos (mg/L).	32
Figura 5. Histórico de los contaminantes hidrológicos del río. Imágenes superiores: Estación B01. Imágenes inferiores: Estación B02.	34
Figura 6. Histórico de los contaminantes de aguas subterráneas de la estación B03.	35
Figura 7. Histórico de los contaminantes de aire. Imagen superior izquierda: Estación B15. Imagen superior derecha: Estación B14. Imagen inferior: Estación B16.	36
Figura 8. Histórico de los contaminantes de aire. Imagen superior izquierda: Estación B17. Imagen superior derecha: Estación B13. Imagen inferior: Estación B12.	37
Figura 9. Histórico de los valores de los contaminantes NO y O3 de la estación B15.	38
Figura 10. Histórico del estado trófico mediante la clorofila-a.....	38
Figura 11. Contaminantes de las estaciones del litoral Besòs 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos de la ACA.....	39
Figura 12. Contaminantes de las estaciones dell litoral Besòs 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos de la ACA.....	40
Figura 13. Contaminantes de las estaciones del río Besòs 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos de la ACA.	41
Figura 14. Contaminantes de las estaciones del río Besòs 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos de la ACA.	42
Figura 15. Contaminantes de la estación de aguas subterráneas 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos de la ACA.	43
Figura 16. Contaminantes de la estación de aguas subterráneas 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos de la ACA.....	43
Figura 17. Contaminantes de las estaciones de aire 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos GenCat.....	44
Figura 18. Contaminantes de las estaciones de aire 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIs y datos GenCat.....	45
Figura 20. Resultados de la presión del sistema de los indicadores hidrológicos del litoral.	47
Figura 21. Resultados de la presión del sistema de los indicadores hidrológicos del río.	48
Figura 22. Resultados de la presión del sistema de los indicadores hidrológicos de aguas subterráneas.	48
Figura 23. Resultados de la presión del sistema de los indicadores del aire.	49
Figura 24. Resultados de la presión del sistema del indicador clorofila-a.....	49
Figura 25. Resultados del estado del sistema de los indicadores hidrológicos del litoral.	50
Figura 26. Resultados del estado del sistema de los indicadores hidrológicos del río.	51
Figura 27. Resultados del estado del sistema de los indicadores hidrológicos de aguas subterráneas.	51
Figura 28. Resultados del estado del sistema de los indicadores del aire.	52
Figura 29. Resultados del estado del sistema del indicador clorofila-a.....	52
Figura 30. Resultados de la respuesta del sistema de los indicadores hidrológicos del litoral. .	53

Tabla 10. Resultados indicadores hidrológicos del río (B01, B02) y subterráneo (B03) del parámetro de respuesta.....	54
Figura 31. Resultados de la respuesta del sistema de los indicadores del aire.	54
Figura 32. Resultados de la respuesta del sistema del indicador clorofila-a.	55
Tabla 11. Resultados de la aplicación de indicadores ambientales en los índices en cada una de las estaciones.	55
Figura 33. Indicadores hidrológicos de río, litoral y subterráneo aplicando media aritmética en PSR.....	57
Figura 34. Indicadores del aire aplicando media aritmética en PSR.	58
Figura 35. Indicador de la clorofila-a aplicando media aritmética en PSR.....	59
Figura 36. Imagen izquierda: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con los estados del indicador Nitrato. Imagen derecha: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con las presiones del indicador amonio.....	60
Figura 37. Imagen superior: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con los estados de los indicadores NO y NO ₂ . Imagen inferior: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con las presiones de los indicadores NO y NO ₂	61
Tabla 12. Resultados de la aplicación de indicadores ambientales en los índices en cada una de las estaciones.	62
Figura 38. Resultados de los índices de las respuestas del sistema con los estados del sistema. Imagen superior: estaciones con R=0,5. Imagen inferior: estaciones con R=1.	63
Figura 39. Resultados de los índices de las respuestas del sistema con las presiones del sistema. Imagen superior: estaciones con R=0,5. Imagen inferior: estaciones con R=1.	64
Figura 40. Análisis geográfico de las estaciones del litoral en el año 1997.	76
Figura 41. Análisis geográfico de las estaciones del litoral en el año 2004.	77
Figura 42. Análisis geográfico de las estaciones del litoral en el año 2012.	78
Figura 43. Análisis geográfico de las estaciones del río en el año 2008.	79
Figura 44. Análisis geográfico de las estaciones del río en el año 2011.	80
Figura 45. Análisis geográfico de las estaciones del aire en el año 2004.....	82
Figura 46. Análisis geográfico de las estaciones del aire en el año 2012.....	83
Figura 47. Tendencias de los contaminantes del aire.	85
Figura 48. Tendencias de los contaminantes del aire.	87
Figura 49. Tendencias de los contaminantes del aire.	89
Figura 50. Tendencias de los contaminantes del aire.	91
Figura 51. Tendencias de los contaminantes del aire.	93
Figura 52. Tendencias de los contaminantes del aire.	95
Figura 53. Análisis geográfico de las estaciones de la clorofila-a (mg/m ³) en el año 2008.....	96
Figura 54. Análisis geográfico de las estaciones de la clorofila-a (mg/m ³) en el año 2012.....	97
Figura 55. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m ³).....	98
Figura 56. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m ³).....	99
Figura 57. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m ³).....	100
Figura 58. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m ³).....	101
Figura 59. Resultados indicadores.	103
Figura 60. Resultados indicadores.	104
Figura 61. Resultados indicadores.	104
Figura 62. Resultados indicadores.	105

1. Introducción

En los últimos 100 años, la revolución industrial produjo la mayor explosión demográfica de la historia, gracias a los avances en medicina y la mecanización de la agricultura, apareciendo la agricultura intensiva. Por tanto, ni la falta de alimento ni las enfermedades son ya causas importantes de resistencia ambiental (factores que limitan el crecimiento de una población) para el ser humano. En el pasado, cuando la población era más reducida, los residuos se producían en unas cantidades que el ambiente podía absorber y eliminar, pero actualmente la cantidad de residuos que se producen es tan grande que tienden a acumularse causando impactos ambientales.

Si se mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, industrialización, contaminación ambiental, producción de alimentos y agotamiento de los recursos, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso tanto de la población como de la capacidad industrial [1]. La duda que surge sería ¿podemos seguir mucho tiempo con este crecimiento exponencial insostenible? ¿Dónde estará nuestra capacidad de carga?

El término “desarrollo sostenible” se ha convertido en uno de las expresiones más ampliamente usadas en el contexto económico, ambiental y social. Describe una visión prevista para el desarrollo que proporciona soluciones para los problemas sociales, económicos y ambientales actuales y futuros (tales como pobreza, enfermedad, desempleo, violencia, contaminación ambiental y pérdida de biodiversidad). En esencia se trata de “mejorar la calidad de vida mientras se vive con la capacidad de carga en soportar ecosistemas” [2].

Los esfuerzos por cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio han contribuido a alcanzar logros considerables en cuanto a desarrollo humano. A pesar de ello, siguen habiendo retos importantes aún por erradicar como la pobreza extrema; niveles altos de desempleo y empleo vulnerable; el consumo y la producción; y la degradación medioambiental repercute de forma negativa en la vida de millones de personas. En la mayoría de los casos, estas tensiones obstaculizan el progreso ya conseguido al cumplir los objetivos de desarrollo acordados a nivel nacional e interno. Para conservar los logros alcanzados y afrontar los actuales retos para el desarrollo a los que el mundo se enfrenta se necesita algo más que pequeños cambios [3].

El 25 de septiembre de 2015, la nueva agenda para el desarrollo sostenible adoptó un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible [3]. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años. De los cuales, en la presente tesis se centrarán en la contaminación del aire (objetivo 12), contaminación del agua (objetivo 6, 12, 14 y 15) y en el estado trófico (objetivo 14 y 15). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible mencionados se listan en la tabla 1.

Tabla 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible aplicables a esta tesis.

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	Metas
Objetivo 3: Asegurar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades [7]	3.9. Reducir substancialmente el número de muertes y enfermedades debido a químicos peligrosos y debido a la contaminación del aire, agua y suelo.
Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos [5]	6.3. En 2030, mejorar la calidad de agua reduciendo las emisiones, eliminando vertederos, minimizando el uso de químicos peligrosos, reducir la cantidad de agua no tratada y reutilizar el agua de forma segura.
Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles [3]	12.4 En 2020, lograr la buena gestión ambiental de productos químicos y sus residuos a través de su ciclo de vida con acuerdos de marcos internacionales; y reducir significativamente emisiones al aire, agua y suelo para minimizar sus impactos adversos en la salud humana y al medio ambiente.
Objetivo 14: Conservar y utilizar en forma sostenible los océanos , los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible [8]	<p>14.1. En 2025 prevenir y reducir significativamente contaminación marina de todo tipo, en particular de actividades terrestres incluyendo desechos del mar y contaminación de nutrientes.</p> <p>14.2 En 2020, gestionar y proteger de forma sostenible los ecosistemas marinos y costeros para evitar impactos significativamente adversos, incluyendo fortaleciendo su resiliencia y tomar acciones para su restauración para lograr tener océanos productivos y limpios.</p>
Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las	15.1 En 2020, asegurar la conservación, restauración y uso sostenible de los ecosistemas de agua dulce tales como bosques, humedales, montañas, zonas

Consecuentemente, la conciencia de la contaminación del aire está reflejado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estimaciones relevantes de exposición y de impactos de contaminación del aire son la clave para informar mejor a la administración pública. Estas cifras son necesarias para monitorear el progreso en las mejoras de la calidad del aire y para ayudar a evaluar la efectividad de las políticas destinadas a reducir la contaminación del aire así como una evaluación de cuánto están contribuyendo a proteger la salud.

Cada vez es más urgente mejorar la calidad del agua dulce a nivel mundial abordando la contaminación del agua y haciendo un mejor uso de las aguas residuales. Se estima que aproximadamente el 80 por ciento de las aguas residuales procedentes de asentamientos humanos y fuentes industriales de todo el mundo se vierte directamente sin tratar a masas de agua [4]. Más de 1,7 mil millones de personas viven en cuencas fluviales donde el uso del agua supera su recarga, conllevando así la desecación de los ríos y el agotamiento de las aguas subterráneas [5]. A medida que los países crecen y las poblaciones aumentan y se urbanizan, se espera que su demanda de agua aumente en un 55 por ciento de aquí a 2050 [6]

El consumo y la producción constituyen el núcleo de la economía mundial [3]. A pesar de ello, las actuales modalidades de consumo y producción insostenibles conducen a la deforestación, la escasez de agua, el desperdicio de alimentos y elevadas emisiones de dióxido de carbono además de otros gases contaminantes para el medio ambiente, y causan la degradación de ecosistemas clave [3,7]. El logro del objetivo de consumo y producción sostenibles creará sinergias y apoyará la consecución de otros objetivos relacionados con la alimentación, el agua y la energía, al tiempo que contribuirá a la mitigación del cambio climático. El consumo y la producción sostenibles significan hacer más y mejores cosas con menos recursos. Se trata “del uso de bienes y servicios que responden a necesidades básicas y proporcionan una mejora en la calidad de vida, a su vez de la minimización del uso de recursos naturales, materiales tóxicos y emisiones de desperdicios y contaminantes sobre el ciclo de vida, de tal forma que no se ponen en riesgo las necesidades de futuras generaciones. Uno de los principales errores en la mitigación de estos problemas es no asumir el coste derivado del daño por nutrientes a los ecosistemas marinos y de agua dulce en el precio del fertilizante y de las políticas y prácticas de gestión de aguas residuales procedentes de la actividad humana y ganadera y no asumir los daños económicos y ambientales de la acidificación de los océanos estableciendo un precio adecuado a las emisiones de carbono y eliminando las subvenciones a los combustibles fósiles [3].

Las cantidades de nutrientes vertidas a los océanos y a las costas se han triplicado desde la época preindustrial, provocando así un incremento geométrico en zonas hipóxicas costeras. El 20 por ciento de los arrecifes de coral del mundo ya se ha perdido y otro 20 por ciento se ha degradado. Los manglares se han reducido del 30 por ciento al 50 por ciento de su extensión histórica y el 29 por ciento de hábitats de la pradera marina ha desaparecido desde finales del año 1800. Se estima que de 10 millones a 20 millones de los 300 millones de toneladas de plástico que se produce cada año en todo el mundo se incorpora en los océanos y daña a ecosistemas y especies [8]. Finalmente, debido a las emisiones de dióxido de carbono de la actividad humana, la acidificación de los océanos se incrementa rápidamente, quizás al ritmo más alto hasta el momento aumentando así un 30 por ciento durante los últimos 50 años [8].

El PNUD presta su apoyo a: la adaptación basada en los ecosistemas para contribuir a que las comunidades aumenten su resiliencia y la resiliencia de los ecosistemas; la creación de empleos mediante proyectos de rehabilitación a gran escala; la expansión y conexión de las zonas protegidas para conservar bosques y humedales como barreras naturales; el mantenimiento y la restauración de ecosistemas como sumideros de carbono; la seguridad de la tenencia de la tierra; y el acceso a nuevos métodos de financiación. Además, el PNUD presta su apoyo a la gestión y rehabilitación de los ecosistemas para la adaptación al cambio climático y su mitigación [9].

Esta tesis trata de hacer un análisis de la calidad ambiental en base a los parámetros descritos anteriormente: la calidad del agua, del aire y del estado trófico. En este análisis, se incluye una metodología de indicadores ambientales llamado PSR (que por sus siglas en inglés sería *“Pressure”, “State” y “Response”*) cuya función es ayudar a realizar análisis y difusión de la información disponible, ayudando a describir fenómenos complejos y sintetizando una gran cantidad de datos para ofrecer a la opinión pública. Como caso de estudio se propone el estudio de la zona del litoral del Besòs y de su desembocadura en términos de agua del litoral, agua de río, agua subterránea, aire de la zona del Besòs y del estado trófico.

A continuación, se detallan los 3 campos de estudio que se analizan en esta tesis (Agua, aire y estado trófico) para situar en contexto al lector.

1.1. Calidad del Agua

La contaminación del agua es una de las mayores amenazas de los recursos hídricos en el mundo. Dallas y Day (1993) definen “contaminación” como “la presencia de cualquier sustancia ajena que perjudica la utilidad del agua”. Los contaminantes de agua dulce se originan principalmente por la industria, por la minería, uso doméstico y uso agrícola. Los de mayor preocupación incluyen los químicos orgánicos e inorgánicos, nutrientes de plantas, desechos que requieren oxígeno, materiales radioactivos, sedimentos y contaminantes microbiológicos [10].

El tipo y cantidad de contaminación variará de la captación a la cuenca, dependiendo del uso de tierra y del desarrollo de patrones con cada captación. No es viable monitorear todas las formas de contaminación y los indicadores se deberán escoger teniendo en mente el uso de suelo dominante de una cuenca de captación.

Varios problemas afectan la sostenibilidad del agua de las cuencas de los ríos. De los cuales son problemas sociales, económicos y ambientales. Sin embargo, son tratados de manera separada y no como un proceso dinámico e integrado [11].

La relación establecida entre la sociedad con el agua manifiesta el modelo de la sociedad con la naturaleza y entre los miembros que conforman esa sociedad. En la modernidad, el discurso que domina en la política del agua se refiere únicamente como recurso hídrico, desvinculándola de su contexto territorial y abstrayéndola de su intrínseca relación con el ciclo hidrológico y los ecosistemas así como de su vinculación con las poblaciones que habitan y dependen de esos ecosistemas [12]. El concepto del agua como recurso apropiable, escondido del territorio, materializa una relación de dominación del ser humano en la naturaleza, debido al avance tecnológico y la mercantilización del agua al servicio de los intereses de los grupos que detentan el poder económico y político definiendo los objetivos de la sociedad en base a fines

instrumentales de perpetuación de las relaciones de poder, de expansión financiera y de crecimiento económico.

El valor del agua es el valor de su escasez construida socialmente en la que es apropiada por un agente, se convierte escasa para los demás y su gestión se encamina a maximizar su obtención, perdiendo así de vista su disponibilidad futura.

La capacidad tecnológica del ser humano para intervenir en la naturaleza ha generado crecientes problemas socioambientales. Por lo que pasa a ser una sociedad del riesgo ya que pone en riesgo la viabilidad ecológica del planeta y, por ende, de las personas que lo habitamos y habitarán en el futuro.

Entre la producción acelerada de riesgos (contaminación; agotamiento de recursos naturales; pérdida de biodiversidad; alteración de los ciclos hidrológico, atmosféricos, de nutrientes, de sedimentos; alteración del clima; incremento de la vulnerabilidad social frente a cambios tecnológicos, ambientales y económicos) emergen modelos alternativos de relación sociedad-naturaleza. Con respecto al agua, estos modelos parten de una reformulación de la percepción del agua y de su importancia social. Estos modelos alternativos de percepción y relación con el agua parten de una visión ética, integral y multifuncional del agua.

En estos modelos alternativos se tiene que cuenta que el agua es un recurso renovable pero limitada en el tiempo y en el espacio ya que la disponibilidad depende de la salud de los ecosistemas por los que transcurre. Por lo que el agua configura el territorio, el paisaje y el espacio vital. Además configura el espacio vital de la sociedad no sólo desde el punto de vista de la supervivencia sino desde la perspectiva emocional. El agua es un elemento de referencia de la identidad cultural de los pueblos ya que los paisajes de agua así como las experiencias vividas en torno al agua configuran una parte importante de la identidad cultural de las personas y de los pueblos que se manifiesta como referencia territorial y vivencial a través de la idiosincrasia popular, las festividades, la toponimia, las expresiones artísticas, la ritualidad o las experiencias lúdicas. El deterioro o la desaparición de un ecosistema no afectarán sólo a la generación actual sino que lo hará también a las generaciones futuras.

El informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (edición 2017), “Aguas Residuales: el recurso desaprovechado”, manifiesta que la mejora en la gestión de las aguas residuales genera beneficios económicos, ambientales y sociales esenciales para el desarrollo sostenible [13]. El Informe tiene como objetivo informar al sector privado a los encargados de la adopción de decisiones, a la sociedad civil y al gobierno con respecto a la importancia de gestionar las aguas residuales como una fuente infravalorada y sostenible de nutrientes, agua, energía y otros subproductos recuperables.

La gestión mejorada de las aguas residuales no solo es crucial para lograr el Objetivo de Desarrollo Sostenible sobre agua potable y saneamiento, sino también para la consecución de otros objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [14].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) presentó una cuarta edición de la Guía para la calidad del agua potable de la OMS [15] que ha sido utilizado por países de todo el mundo, en vías de desarrollo y desarrollados, como base para la elaboración de reglamentos y normas orientados a garantizar la inocuidad del agua potable. En especial, esta cuarta edición ha sufrido una modificación con el fin de incorporar nuevos conocimientos sobre evaluación y gestión de riesgos. Se describe un Marco orientado a garantizar la inocuidad del agua potable y aborda las funciones y responsabilidades de los diferentes interesados.

La finalidad de la Guía es apoyar el desarrollo y la ejecución de estrategias de gestión de riesgos que garanticen la inocuidad del abastecimiento de agua por medio del control de los componentes peligrosos del agua. Esta guía describe los requisitos mínimos razonables que deben cumplir las prácticas seguras para proteger la salud de los consumidores, y determinan valores de referencia numéricos de los componentes del agua para su calidad.

Por otro lado, La Comisión Europea estableció una directiva en 2007. El objetivo de esta directiva es de establecer una guía identificando los parámetros químicos y sus valores límites para el consumo de agua dulce [16].

A continuación se describen los contaminantes en aguas residuales de los que se han obtenido indicadores ambientales.

1.1.1. Amonio

Las concentraciones naturales de amonio en aguas subterráneas y superficiales suelen ser menores que 0,2 mg/l, pero las aguas subterráneas anaerobias pueden contener hasta 3 mg/l [15]. También pueden producir contaminación con amoniaco los revestimientos de tuberías con mortero de cemento. El amoniaco es un indicador de posible contaminación del agua con bacterias, aguas residuales o residuos de animales. El amoniaco es uno de los principales productos del metabolismo de los mamíferos. La exposición al amoniaco de fuentes medioambientales es insignificante comparada con la derivada de su síntesis endógena. Sólo se observan efectos toxicológicos a exposiciones superiores a alrededor de 200 mg/kg de peso corporal. La presencia de amoniaco en el agua de consumo no tiene repercusiones inmediatas sobre la salud, de modo que no se propone un valor de referencia basado en efectos sobre la salud. No obstante, el amoniaco puede reducir la eficiencia de la desinfección, ocasionar la formación de nitrito en sistemas de distribución, obstaculizar la eliminación de manganeso mediante filtración y producir problemas organolépticos. El valor de la concentración correspondiente al umbral olfativo del amoniaco a pH alcalino según la OMS es de aproximadamente 1,5 mg/L. y se ha sugerido un umbral gustativo de 35 mg/l para el catión amonio. En cambio, la Comisión Europea establece 0,5 mg/L la concentración límite para que el amonio sea apta para beber. Por lo que se propone dicho valor en esta tesis como valor límite del contaminante amoniacal en aguas [16].

1.1.2. Cloro

Respecto al contaminante de cloro en agua, a lo que se refiere las Normas internacionales para el agua potable de la OMS de 1958, se sugirió que las concentraciones superiores a 600 mg/L afectarían de forma notable a la potabilidad del agua. En las Normas internacionales de 1963 y 1971 conservaron este valor como concentración máxima permisible. En 1984, se publicó la primera edición de las *Guías para la calidad del agua potable* en el que se estableció un valor de referencia de 250 mg/L basado en consideraciones gustativas. Finalmente, en las guías de 1993 no se propuso ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el cloruro en el agua de consumo, aunque se confirmó que el agua puede tener un sabor perceptible con concentraciones superiores a unos 250 mg/L [17]. Además, la Comisión Europea establece el mismo valor como valor límite para que el agua sea apta para beber. Por lo que en esta tesis se propone 250 mg/L como valor límite de cloruros en agua.

1.1.3. Fósforo

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales y residuales. Éstos se clasifican como ortofosfatos, compuestos organofosfatados y fosfatos condensados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes tales como productos de limpieza, procesos biológicos, fertilizantes, etc. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en aguas puede estimular el crecimiento de organismos fotosintéticos en cantidades nocivas. Además, los fosfatos pueden ser tóxicos para los organismos ya que incrementan el riesgo de cáncer mediante su ingesta en alta concentración [18]. Su umbral de concentración de fosfato, la OMS no tiene especificado un valor de referencia basado en efectos sobre la salud. No obstante, la Directiva 91/271/CEE, que define los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas, establece como valor límite 2 mg/L de fosfato en las salidas de las plantas de tratamiento de cada industria [19]. Así pues, se establece 2 mg/L de fosfato como límite de contaminante en el indicador.

1.1.4. Nitrito y nitrato

El nitrito y nitrato son iones de origen natural que forman parte del ciclo del nitrógeno. La concentración de nitrato en aguas subterráneas y superficiales suele ser baja pero podría aumentar a causa de la filtración o escorrentía de tierras agrícolas o debido a la contaminación por residuos animales o humanos como consecuencia de la oxidación del amoníaco. Las condiciones anaerobias pueden favorecer la formación y persistencia del nitrito. La formación de nitrito es consecuencia de la actividad microbiana y puede ser intermitente. Además, existen afectaciones humanas ya que después de su ingesta, los nitratos se convierten en nitritos por la microflora microintestinal e incrementa los radicales libres oxidados que predisponen a las células a daños irreparables. Podría causar otros efectos tales como cáncer, aumento de la mortalidad infantil, abortos, diarrea y deterioro del sistema inmunitario [20]. En los umbrales de nitrato y nitrito, la concentración de cada uno y su valor de referencia según la OMS no debe ser mayor que 1 mg/L [21]. En cambio, la Comisión Europea propone como valores límites de agua potable para nitratos y nitritos 50 mg/L y 0,5 mg/L respectivamente. Por lo que se propone en esta tesis este valor como valor límite del contaminante en aguas residuales.

1.1.5. Sodio

Las concentraciones de sodio en el agua potable normalmente son inferiores a 20 mg/L, aunque en algunos países pueden superar en gran medida esta cantidad [22]. No se pueden extraer conclusiones definitivas con respecto a la posible asociación entre la presencia de sodio en el agua de consumo y la hipertensión. Por consiguiente, la OMS no propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud. No obstante, el agua podría tener un gusto inaceptable si las concentraciones rebasan los 200 mg/L [22]. Además, la Comisión Europea establece dicho valor como agua apta para beber. Por lo que en esta tesis se propone 200 mg/L como valor límite de sodio en agua.

1.1.6. Sólidos disueltos totales

Los sólidos disueltos totales (SDT) comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, bicarbonatos y sulfatos). No se ha propuesto ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para los SDT [23], tampoco la Directiva 2007 recoge valores límites para estas sales inorgánicas. Sin embargo, la presencia de sólidos disueltos en agua podría afectar en su gusto. La OMS propone que los valores de SDT por debajo de 300 mg/L tienen calidad excelente y los valores de SDT por encima de 1200 mg/L tienen calidad inaceptable. Por lo que en esta tesis se toman ambos valores para fijar un valor mínimo y máximo de referencia en la ponderación de los indicadores.

1.2. Contaminación del aire

La contaminación del aire está en el corazón de la toma de decisiones políticas. En estimaciones, la organización mundial de la salud (OMS) reporta que aproximadamente 3 millones de personas murieron como resultado de la contaminación aérea en 2012 (uno de cada nueve muertes) [24]. Países como los miembros de la unión europea y EEUU han implementado regulaciones estrictas para mejorar la calidad del aire. La contaminación del aire afecta a todas las regiones, entornos grupos socioeconómicos y grupos de edad. Mientras toda la gente vive en un área determinada respirando del mismo aire, hay sin embargo diferencias geográficas de exposición en la contaminación del aire. Ciudadanos de las grandes metrópolis en África, Asia o medio oriente respira niveles mucho más elevados de contaminantes del aire que en otras partes del mundo].

La calidad del aire ha sido el mayor problema en Europa desde a principios de 1970 [25]. En 1996, la Unión Europea adoptó una serie de acciones para reducir las emisiones de contaminantes por todo el continente. El más importante fue el establecimiento de objetivos vinculantes sobre la calidad del aire y la implementación de una estructura armonizada para el monitoreo, reporte y la gestión de la calidad del aire a través de la UE mediante el AQFD 1996 y sus directivas de desarrollo. Estas directivas de desarrollo establecieron límites y umbrales de alerta para la contaminación aérea más predominante con el fin de proteger la salud humana.

En España, un número importante de trabajos, como los enmarcados en los proyectos APHEA [26,27], APHEIS [28,29], EMECAM-EMECAS [30-32] han evaluado el impacto de este tipo de contaminación en España. Los resultados de estos estudios indican que la contaminación atmosférica sigue representando un riesgo para la salud. Por lo que las políticas y acciones encaminadas a reducirla tendrían un efecto beneficioso sobre la salud de la población española [33].

Dentro de la aplicación de las directivas EU de calidad del aire [34] muestra que las partículas en suspensión (PM) y los óxidos de nitrógeno en áreas urbanas con tráfico intenso, y el ozono en áreas rurales, son los contaminantes que presentan problemas de cumplimiento de los valores límites establecidos. En especial, las partículas en suspensión de diámetro 10 micrómetros (PM 10) en España presenta problemas frecuentes ya que supera más de 35 días al año del valor límite diario [35,36]. La gran diferencia entre los valores de PM10 y partículas en suspensión de diámetro 2,5 micrómetros (PM2,5) entre países mediterráneos y norte-centro de Europa es la mayor proporción de material mineral en los primeros respecto a los segundos [36,37]. Una de los motivos es debido a una menor precipitación y menor ventilación atmosférica del sur de

Europa respecto a la del centro y norte de Europa [38,39], pero también se debe por el aporte de material de partículas procedentes del norte de África [40,41].

Con lo que respecta a Barcelona, ofrece un atractivo escenario medioambiental para estudiar los efectos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud cuya contaminación viene determinada principalmente por las emisiones de los vehículos. Los niveles de dióxido de nitrógeno estuvieron en 1997 en el rango más alto entre las ciudades occidentales participantes en el estudio APHEQA [42]. Para el conjunto de las emisiones de contaminantes atmosféricos en Barcelona se ha estimado que el 71% pueden atribuirse al tráfico, el 21% a la actividad industrial y el 2% a la masa forestal [43].

En Barcelona se realizaron estudios en los que se hallaron una relación a corto plazo entre los niveles de contaminación y el número de admisiones en urgencias por enfermedad pulmonar obstructiva crónica [44,45] y asma [46]. Se llegó a la conclusión de que existe una relación entre el dióxido de azufre y las partículas con la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) [44], y del dióxido de nitrógeno y las partículas con el asma [46]. Además, dentro del marco de estudio APHEA, se encontró una asociación de dióxido de azufre con la mortalidad, en especial con la mortalidad respiratoria y cardiovascular [47].

Los contaminantes del aire se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Se clasifican como contaminantes criterio aquellos que se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó de esta manera ya que fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos [48] cuyo objetivo era establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Este término ha sido aceptado en muchos otros países. Dichos contaminantes son el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, materia particulada, plomo, monóxido de carbono y ozono.

Para cada contaminante criterio se han desarrollado normas y guías. Las normas establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un periodo definido diseñados con un margen de protección ante los riesgos y cuya finalidad es proteger el medio ambiente y la salud humana. Las guías son recomendaciones que establecen los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos.

A continuación se describen los contaminantes atmosféricos de los que se han obtenido indicadores ambientales.

1.2.1. SO₂

El dióxido de azufre es un contaminante principalmente antropogénico. Es un gas que se origina sobre todo durante la combustión de carburantes fósiles que contienen azufre tales como el petróleo y combustibles sólidos. Se lleva a cabo en los procesos industriales de alta temperatura y de generación eléctrica [49]

En los últimos años se ha producido un descenso radical de las emisiones de SO₂ producidas por la combustión en industrias de producción de energía debido a diversos factores como el Plan

2007 de Reducción de Emisiones de Grandes Instalaciones de Combustión (GICs) [31] que obligó a la introducción de tecnologías de desulfuración.

El principal emisor de SO₂ es el sector industrial, con lo cual la distribución temporal de los niveles de este gas suele venir determinada por los periodos en los que la industria emisora que afecta a la estación está en funcionamiento.

Este contaminante puede producir efectos adversos sobre la salud tales como afecciones e insuficiencias pulmonares, irritación e inflamación del sistema respiratorio, alteración del metabolismo de las proteínas, dolor de cabeza o ansiedad), sobre la biodiversidad, los suelos y los ecosistemas acuáticos y forestales (daños en la vegetación, degradación de la clorofila, reducción de la fotosíntesis y la consiguiente pérdida de especies).

El valor límite diario (VLD) para la protección de la salud humana (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2010) es actualmente 125 µg/m³. Por lo que se propone dicho valor en esta tesis como valor límite del contaminante en aire.

1.2.2. NO y NO₂

Como contaminantes, son gases que se emiten en los procesos de combustión que se llevan a cabo en relación con el tráfico y con el transporte en general, así como en instalaciones industriales de alta temperatura y de generación eléctrica.

En ambiente urbano, generalmente más del 75% del NO₂ en aire ambiente es aportado por el tráfico por combustiones en los que los hidrocarburos no se hayan quemado bien y mediante la combinación de radiación de la luz ultravioleta del sol producen lo que se conoce como smog fotoquímico. Esta contribución es mayor que la que aporta al Inventario Nacional de Emisiones [32,33] debido a que los ciudadanos viven muy próximos al tráfico rodado, y aunque en tonelaje las emisiones son inferiores a las de otras fuentes, su contribución a la exposición humana en ciudades es muy superior.

A lo largo de los años se ha producido globalmente una disminución de las emisiones de estos contaminantes, que resulta más marcada si se atiende a focos individuales como el tráfico (que continua siendo el problema más relevante en este contaminante) o la combustión en las industrias energéticas, que han experimentado una caída importante a partir del año 2008 [49].

Los niveles más altos de NO_x se alcanzan en las grandes aglomeraciones urbanas y en sus zonas metropolitanas, así como en el entorno de las vías de comunicación con tráfico más denso.

El valor límite diario (VLD) para la protección de la salud humana (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2010) establecido por el Real Decreto 102/2011 es actualmente 40 µg/m³. Por lo que se propone dicho valor en esta tesis como valor límite del contaminante en aire.

1.2.3. O₃

En España y en todo el resto del sur de Europa, el ozono constituye un problema generalizado, debido a sus especiales condiciones de elevada insolación; por lo que se reparte por toda la península con niveles comparativamente inferiores a diferencia de la zona norte.

La velocidad y el grado de formación de ozono se ven incrementados con el aumento de la radiación solar, las emisiones antropogénicas de precursores y el ciclo biológico de emisiones biogénicas de COVs. Por lo que sus niveles son más elevados en el sur de Europa y en las estaciones de primavera y verano.

Además, los niveles de ozono son superiores en la parte periférica de las grandes urbanizaciones y en las zonas rurales porque la reacción fotoquímica necesita una cierta distancia para generar O₃ a partir de sus precursores. Una vez formado y en entornos urbanos con altos niveles de NO, el O₃ se consume rápidamente mediante la oxidación de NO a NO₂. Es por ello que en zonas urbanas de tráfico, los niveles de O₃ suelen ser muy bajos, mucho más bajos que en entornos poco contaminados.

Semanalmente, los niveles de O₃ más elevados se registran los fines de semana y, sobre todo, el domingo, en coherencia con la disminución de los niveles de precursores que se registra en tales días [30].

El valor límite diario (VLD) para la protección de la salud humana (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2010) establecido por el Real Decreto 102/2011 es actualmente 120 µg/m³. Por lo que se propone dicho valor en esta tesis como valor límite del contaminante en aire.

1.2.4. CO

De los contaminantes atmosféricos, el monóxido de carbono (CO) es conocido por su toxicidad biológica; el CO puede ligarse con la hemoglobina de los livianos y formas de carboxihemoglobina la cual hace decrecer la capacidad portadora de oxígeno de la molécula de sangre, reduciendo así la disponibilidad de oxígeno del cuerpo teniendo como resultado tejidos hipóxicos [50]. El CO es principalmente producido por combustiones incompletas de los hidrocarburos. En las zonas urbanas, las grandes cantidades proceden de vehículos, seguido de procesos industriales y sistemas de calefacción. En un estudio realizado en China [51] se observó una asociación significativa entre la exposición en un ambiente de CO y el incremento de mortalidad en ciudades.

El CO penetra en el organismo a través de las vías pulmonares provocando una disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, con el consecuente detrimento de oxigenación de órganos y tejidos, así como disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso, dolor de cabeza, fatiga y mareos.

El valor límite diario (VLD) para la protección de la salud humana (fecha de cumplimiento: 1 de enero de 2010) establecido por el Real Decreto 102/2011 es actualmente 10 mg/m³. Por lo que se propone dicho valor en esta tesis como valor límite del contaminante en aire.

1.3. Estado trófico

El estado trófico de las masas de agua es un concepto fundamental en la ordenación de los mismos ya que significa la relación entre el estado de nutrientes en una masa de agua y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo. El estado trófico de una masa de agua se refleja en su grado de eutrofización que se define como el proceso de cambio de un estado trófico a otro nivel superior por adición de nutrientes, especialmente de los componentes de nitrógeno y fósforo.

Uno de los problemas medio ambientales más importantes en la calidad de aguas de río es la eutrofización [52, 53]. Actividades antropogénicas tales como la agricultura, la descarga de aguas residuales, emisiones de vehículos marinos y procesos de combustión puede conllevar un sobre-enriquecimiento y eutrofización de agua de mar.

La eutrofización es el enriquecimiento de los nutrientes del agua, especialmente de los componentes de nitrógeno y fósforo cuya problemática es el crecimiento acelerado de algas y formas de vida de plantas que tiene como resultado alteraciones del ecosistema del agua y el deterioro de la calidad del agua [54]. El agua se vuelve turbia debido a los componentes orgánicos procedentes de plantas y animales. Esto afecta de manera directa a la concentración de oxígeno disuelto en agua ya que disminuye por el crecimiento de plantas y biomasa de plancton en la zona acuática. La ausencia de oxígeno hace que las bacterias anaeróbicas ataquen a los componentes orgánicos y, de esta forma, liberan sulfuro de hidrógeno [55]. Estas bacterias forman una capa en superficie, que impide el paso de la luz solar y la fotosíntesis, por lo que la vida no se puede recuperar bajo esta capa. Por lo que las zonas acuáticas con baja producción de algas, poseen aguas sumamente claras y con alto contenido de oxígeno, por lo que tales zonas acuáticas soportan una alta biodiversidad marina [56].

1.3.1. Clorofila-a como indicador del estado trófico en el agua

El elemento nutricional del fitoplancton es la clorofila como resultado de la fotosíntesis, es usualmente indicadora de la Productividad Primaria y el principal recurso directo o indirecto nutricional para todos los organismos marino y pesquerías.

Toda la flora contiene clorofila-a, por lo que la concentración de la misma refleja la abundancia de productores primarios que crece en las zonas acuáticas. La clorofila-a es el pigmento común de todos los organismos productores primarios y tiene relación directa con la productividad primaria y el desarrollo vegetal. Por lo que la determinación de clorofila-a es uno de los índices de monitoreo de salud de un sistema acuático natural la cual es utilizada por técnicos e investigadores. Carlson [57] demostró en el año 1977 que existe una relación directa de eutrofización con la concentración de clorofila-a mediante el índice de estado trófico (TSI).

La normativa de referencia de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) clasifica el estado trófico de los sistemas según la concentración de clorofila-a en las categorías de hipereutrófico (mayor de 75 mg/m³), eutrófico (mayor que 25 mg/m³ y menor que 75 mg/m³), mesotrófico (mayor que 8 mg/m³ y menor que 25 mg/m³), oligotrófico (mayor que 2,5 mg/m³ y menor que 8 mg/m³) y ultraoligotrófico (menor de 2,5 mg/m³).

1.4. Indicadores ambientales

Los indicadores ambientales reflejan tendencias en el estado del medio ambiente y monitorizan el progreso realizado en relación a objetivos de corte ambiental. Así pues, los indicadores ambientales se han convertido en una herramienta indispensable para los responsables de políticas ambientales.

En concreto, los indicadores ambientales forman un instrumento útil para realizar análisis y difusión de la información disponible, ayudando a describir fenómenos complejos y sintetizando una gran cantidad de datos que, de otro modo, sería muy difícil ofrecer a la opinión pública. Los indicadores también tienen como función prestar apoyo a la toma de decisiones por parte de las autoridades públicas y aportan transparencia en la información ambiental hacia el público en general [61].

La comunicación es la función principal de los indicadores: Deberían habilitar o promover el intercambio de información con respecto al problema al que va dirigido. Asimismo, los indicadores ambientales proporcionan información sobre fenómenos que se consideran típicos y/o críticos para la calidad ambiental. La abundancia de los charranes negros en un área en concreto y el volumen total de sustancias emitidas por la industria en un periodo determinado son sólo dos de los numerosos indicadores que permiten la comunicación en los problemas ambientales.

La comunicación requiere simplicidad. Los indicadores siempre deben simplificar una realidad compleja. Se centran en aspectos determinados de los que se consideran relevantes y en el que los datos están disponibles. Pero su significado va más allá de lo obtenido directamente de las propiedades observadas. Volviendo al ejemplo de los charranes negros, para conocer su número total sería más relevante comparar el número en un área específica con abundancia de este tipo de pájaro en un área similar pero con menos perturbaciones. Entonces el significado real está en el mensaje de la abundancia de estos pájaros dentro de la calidad ambiental.

Los indicadores ambientales se utilizan para tres propósitos [58]:

1. Para proporcionar información en los problemas ambientales para permitir a los responsables de política ambiental evaluar su gravedad.
2. Para dar soporte al desarrollo de políticas y establecimiento de prioridades a través de la identificación de los factores clave que causan presión en el ambiente.
3. Monitorizar los efectos de las respuestas políticas.

Además, los indicadores ambientales deberían ser usados como una gran herramienta para concienciar al público de las problemáticas ambientales. Proporcionando información de las fuerzas motrices, impactos y respuestas políticas, es una estrategia común para fortalecer el apoyo público para las medidas públicas.

Sin embargo, un problema asociado a la proliferación durante estos últimos años de indicadores ambientales ha sido la comprensión por parte de los usuarios de estas herramientas de su significado y de su relevancia. Cada vez es más urgente contar con marcos conceptuales que estructuren y organicen un conjunto dado de indicadores y que permitan analizar las conexiones

ambientales/sociales relacionadas. Los indicadores ambientales suelen incluir aspectos físicos, químicos y biológicos [58].

Uno de estos marcos es el desarrollo de índices agregados, que abarcan diferentes problemáticas socioeconómicas y ambientales, y que son de gran ayuda para acceder a un nivel de sostenibilidad de las cuencas de los ríos, permitiendo así no sólo una comparación del marco sino también una herramienta para lograr la sostenibilidad de la cuenca [62].

Otro marco ampliamente usado en el contexto de monitoreo ambiental es la clasificación de indicadores atendiendo a relaciones de causalidad, típicamente a través de marcos conceptuales como el del Estado-Presión-Respuesta (PSR), Fuerza motriz-Estado-Respuesta (DSR) y Fuerza motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (DPSIR)[59] tal y como se pueden ver en la Figura 1. Tal y como la similitud que los nombres sugieren, estos marcos tienen mucho en común. Comparten raíces en el marco respuesta-estrés originalmente introducido en 1979 por Friend and Rapport for Canada Statistics [60].

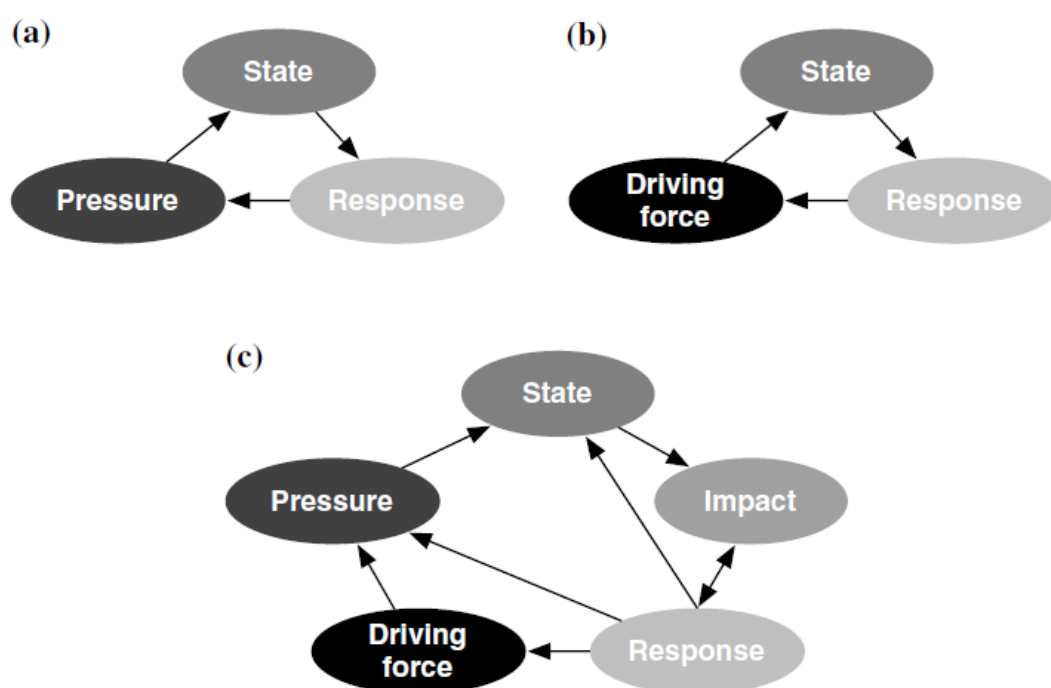


Figura 1 (a) PSR; (b) DSR y (c) DPSIR

1.4.1. Presión-Estado-Respuesta (PSR)

En esta tesis se aplica el marco PSR, desarrollado por la OECD, el gobierno canadiense y la UNEP [63]. Este marco divide indicadores de presión, estado y respuesta a través de la siguiente lógica: "... presión en el medio ambiente desde las actividades humanas y económicas, llevan a cambios en el estado o condiciones ambientales que prevalecen como resultado de esa presión, y se deben provocar respuestas por la sociedad para cambiar las presiones y el estado del ambiente" [64].

El marco PSR sigue la lógica causa-efecto y respuesta de la sociedad. Con el marco, los indicadores se dividen en tres categorías:

- Los indicadores de presión miden las presiones ejercidas en los recursos y ecosistemas a partir de las actividades humanas (Por ejemplo, emisiones, consumo y uso).
- Los indicadores de estado evalúan la condición de los recursos o ecosistema como resultado de las presiones
- Los indicadores de respuesta relaciona las respuestas sociales mediante políticas, leyes, programas, investigaciones, etc.

2. Caso de Estudio: El litoral del río Besòs

El Besòs forma parte de uno de los ríos que configuran el área metropolitana de Barcelona. Con una cuenca de 1039 km², está profundamente alterado por una ciudad de actualmente más de 2 millones de habitantes cuyo consumo elevado de agua es destinado principalmente al uso industrial y urbano ya que la agricultura ha perdido importancia.

Por lo que el ámbito territorial Litoral Besòs tiene un alcance claramente metropolitano y contiene una elevada complejidad social, urbana, política y económica. La convergencia de diversos municipios e instituciones en la gestión de este ámbito territorial dibujan un escenario ambicioso pero altamente diverso y complejo. Formando parte del eje Besòs, se trata de un espacio emergente con el potencial de convertirse en un polo de actividad económica y convivencia que vertebre un nuevo eje central metropolitano. La reciente ubicación del Campus Besòs UPC, el proceso frente la recuperación del frente litoral y sus playas, la regeneración de los márgenes del río Besòs, el recinto del Fórum o el proceso para la transformación urbana de barrios como La Mina o La Catalana, perfilan una estrategia metropolitana que se encamina a dotar este territorio de una nueva centralidad urbana y económica que ha de ser sostenible en tres pilares fundamentales: la economía, el urbanismo medioambiental sostenible y los derechos sociales.

2.1. Contexto histórico

El río Besòs siempre ha sido el paso natural desde Barcelona hacia el interior. Sus aguas han sido utilizadas desde la época de los romanos que construyeron un acueducto desde Montcada. En la segunda mitad del siglo X se construyó la acequia del Rec Comtal cuya infraestructura impulsada por el conde Mir tenía como uso principal el riego de los campos agrícolas colindantes. La fuerza motriz de esta infraestructura era utilizada para los molinos harineros y traperos, que se establecieron a su alrededor y dentro de las murallas de Barcelona. En el 1786, se realizó una importante obra hidráulica con la construcción de la mina de una captación de aguas subterráneas en medio del cauce del Besòs cerca de la confluencia con el río Ripoll para incrementar así el caudal que permitió satisfacer la creciente demanda de abastecimiento de Barcelona debido al aumento de la población y al aumento de la actividad, manufacturera.

2.1.1. Industrialización

En Barcelona, la industrialización tiene un hito importante en 1832 cuando se aplica la máquina de vapor a la producción en la fábrica “El Vapor”, que pretendía hacer la unión de la producción de tejidos con la construcción de maquinaria. La creación de industrias se realizó en una ciudad todavía amurallada y considerada plaza fuerte. Esta empresa pionera de la industrialización barcelonesa y catalana, bajo el nombre de “Bonaplata, Vilaregut, Rull y Compañía”, se situó en la parte sudoeste del interior de la ciudad amurallada, conocida como el Raval. Ocupando terrenos libres pertenecientes a una orden religiosa, próximos a la muralla y junto a una de las puertas de entrada a Barcelona, se instaló un gran conjunto industrial; poco después bajo la dirección de Valentí Esparó se dedicó exclusivamente a maquinaria y estructuras metálicas [65].

El primer gran complejo fabril moderno se formó en la parte baja del Raval más cercana al puerto concentrándose junto al antiguo huerto del convento de benedictinos de Sant Pau del Camp empresas textiles que en el mismo año o solo con dos de diferencia respecto a la de Bonaplata instalaron máquinas de vapor [66]. A su vez, en los barrios de tradición artesana y manufacturera de la parte Oriental cruzados desde la edad media por el Rec Comtal -canal de derivación del río Besòs que atravesando el llano de Barcelona entraba en la ciudad y servía para mover molinos y establecimientos fabriles- se ubicaron también fábricas movidas a vapor.

En el barrio marítimo de la Barceloneta se instalaron industrias mecano-metalúrgicas inicialmente vinculadas a la reparación naval (Nuevo Vulcano, 1834), además de algunas pioneras en la construcción de maquinaria de vapor (Fundición Doménech, Talleres Alexander) y Maquinista Terrestre y Marítima en 1856 gracias a su proximidad al puerto y a la existencia de espacios libres entre su casco urbano y el perímetro de las murallas.

En el último tercio del siglo XIX y tras el derribo de las murallas, se produjo el traslado de industrias hacia los municipios del entorno de Barcelona. Lo cual fue posible gracias a una mejora de las infraestructuras ferroviarias y a los nuevos trazados viarios, junto con las posibilidades de comunicación que la telegrafía y, más tarde, la telefonía permitieron establecer entre las nuevas instalaciones fabriles y las sedes que permanecían en la ciudad antigua [67]

Otras empresas iniciarían procesos de transformación de suelo industrial en suelo residencial contraviniendo incluso –mediante cambios de calificación urbanística a través de planes parciales facilitados por el propio ayuntamiento- la normativa del plan Comarcal de 1953 que las clasificaba como zonas aptas para la industria. Un buen ejemplo de este tipo de proceso fue el conocido como Plan de La Ribera presentado el año 1965 por una asociación de grandes empresas ubicadas en la franja litoral entre la Barceloneta y el río Besòs, cuyas instalaciones resultaban ya obsoletas o se habían trasladado en parte a los polígonos industriales de la ciudad. Dicho Plan, promovido por la sociedad Ribera S.A., trataba de reconvertir el suelo industrial en residencial y terciario de alto nivel [68].

A finales de la década de 1970, hubo la deslocalización de parte de la industria, y del almacenamiento y distribución situada en Barcelona hacia los nuevos polígonos industriales debido a los nuevos cambios tecnológicos, la crisis del sector textil algodónero junto con la emergencia de nuevos sectores productivos (electrónica, farmacéutica) unido al desarrollo de la red de autopistas metropolitanas y a cambios en los sistemas de transporte [69].

El barrio Poble Nou se mantuvo como el gran espacio industrial de Barcelona hasta finales de los años 80, cuyo suelo industrial representaba aproximadamente una cuarta parte o más del suelo industrial de Barcelona compuesto entre otras por industria química [70]; permanecían casi todas las instalaciones históricas y, en muchos casos, con nuevos usos en forma de industrias compartidas a la vez [71].

Posteriormente, operaciones urbanísticas como la apertura de la avenida Diagonal hasta el mar, y la construcción de grandes conjuntos como Diagonal Mar o el Front Marítim sobre las instalaciones de Macosa- otra de las grandes empresas mecano metalúrgicas catalanas- y los terrenos de Catalana de Gas, respectivamente, transformaron el litoral barcelonés en un espacio residencial de renta alta, apenas integrado con el resto del tejido urbano existente.

Barcelona no cuenta todavía hoy con un plan integral de patrimonio industrial a pesar de las propuestas en este sentido realizadas por colectivos de profesionales en los últimos diez años [72]. Parece que la ciudad se avergüence de su trayectoria industrial y no haya superado los planteamientos de inicios del siglo XX, momento en que, según J. Roca, la ciudad industrial y obrera era vista por parte de las clases dirigentes como un peligro.

Mientras la ciudad de Barcelona y los municipios de su entorno próximo (Badalona, Hospitalet, Cornellà,...) pierden tejido industrial, las empresas se desplazan a la región metropolitana, donde existen 695 polígonos industriales con una superficie de 15.926 ha. En ellos se sitúan tanto actividades fabriles como logísticas, creando una nueva corona que continúa y perpetúa la geografía industrial barcelonesa, mientras la ciudad de Barcelona convertida cada vez más en una ciudad monofuncional dedicada al turismo, al ocio y a la actividad terciaria pierde diversidad social y funcional expulsando a la industria y a los grupos populares y clases medias a los entornos más alejados.

2.2. Datos básicos del espacio Litoral Besòs

El espacio Litoral Besòs es un ámbito del Área Metropolitana de Barcelona plurimunicipal donde toman parte dos municipios: Sant Adrià de Besòs y Badalona. A pesar de los límites administrativos, se trata de un continuo urbano que se lee como un recorte territorial unitario donde las fronteras que pillan más presencia son el río Besòs y la trama de infraestructuras viarias de primer orden. La extensión en superficie de los dos municipios suma 26 km², siendo un 85% correspondiente a Badalona y un 15% a Sant Adrià de Besòs.

La población en 2017 de los dos municipios suma 251.654 habitantes y, una vez más, Badalona responde al 85% de esta población, dejando el 15% restante a Sant Adrià de Besòs. A pesar de la diferencia de población entre los dos municipios, la densidad es muy parecida y elevada con más de 9.000 hab/km² a cada uno de ellos y una densidad mediana de 9.672 hab/km².

2.3. Catástrofes del Besòs, “Besossades”

El carácter torrencial del río Besòs conlleva de forma periódica episodios de crecidas de una cierta intensidad (“las Besossades”), muchas veces coincidentes con el inicio del otoño y tras meses de sequía de verano. En estas condiciones y en este periodo se pueden producir lluvias torrenciales en un espacio corto de tiempo pasando de un caudal de entre 3 y 4 m³/s habituales a más de 2.300 m³/s. Este escenario ocurrió el pasado 25 de septiembre de 1962 siendo así la más catastrófica del último siglo.

Esa misma noche, cayeron más de 200 L/m² que afectaron a diversas comarcas catalanas de levante cuyas inundaciones y riadas fuertes que provocaron destrozos en las viviendas [73].

2.4. Marco económico del Litoral

En los últimos años, el Litoral del Besòs se ha ido reorientando hacia el sector terciario a pesar de que la industria pesada aún perdura y es de sectores diversificados: transformados de metálicos, química y de construcción. De este sector industrial, las centrales de ciclo combinado del margen derecho del Besòs d’Enel – Endesa y Gas Natural juegan un papel fundamental, así como también la planta de valorización energética de residuos de Sant Adrià de Besòs. Sin embargo, la tendencia a nivel global es la pérdida de peso de la industria respecto a los servicios.

Desde una perspectiva global, las zonas industriales del Besòs están fragmentadas y tienen diversos operadores. Actualmente, los polígonos de actividad económica del Litoral Besòs ascienden a 9. Badalona contiene 6 polígonos (Badalona Nord, Badalona Sud, Industrial Bonavista, Les Guixeres, Montigalà y Pomar de Dalt) mientras que Sant Adrià de Besòs concentra sólo 2 (El Sot y Montsolís).

El tejido económico de los dos municipios tiene 5.796 actividades censadas de las cuales 711 pertenecen al sector de la industria, 600 al sector de la construcción y 4.485 son empresas de servicio.

En Sant Adrià de Besòs hay dos polígonos industriales. Al margen derecho del río Besòs se encuentra el polígono de Monstolís, la cual se encuentra mayoritariamente en Sant Adrià de Besòs a pesar de tener una pequeña parte en Barcelona. De trata de un polígono muy bien comunicado ya que dispone de accesos desde la Ronda Litoral, sentido sur y de para de metro, La Verneda. Al margen izquierdo del río Besòs se encuentra el polígono del Sot. Este tiene continuidad con la zona industrial de Badalona pero ésta se ha hecho una reconversión a una zona más comercial, con el que ha permitido la renovación de las naves.

Por lo que respecta a Badalona, durante los años cincuenta y sesenta del siglo XIX, con la inauguración del ferrocarril, la industria de diversos sectores se instaló en la ciudad. La Galeta de la Viuda, la refinera de azúcar Fontrodona y Castelló, el Gas de Jaurés y el conocido Anís del Mono, son algunos ejemplos. Las fábricas se multiplican a finales de siglo y se instalan en Badalona industrias como la Cros, la petrolera Canals y Cia o Busquets, Macrons y Cia. La variedad industrial abarcaba todos los sectores, el textil, la química o metalurgia.

A finales del siglo XX, la actividad económica tiende a desplazarse hacia el sector terciario a pesar de haber desarrollado una serie de sectores industriales como el polígono industrial de Les

Guixeres, donde se establece el Badalona Centre Internacional de Negocis con el objetivo de mejorar los servicios, la proyección exterior, los intercambios y la competitividad del mercado europeo y americano de las empresas del municipio. Por otro lado, la creación del polígono Montigalà-Batlòria durante los años 90 consolida aún más el polo económico que sostiene este territorio. La introducción de nuevas tecnologías ha permitido fomentar un crecimiento en términos de exportación.

La pisada de la crisis económica repercutió en el territorio con una intensidad que ha dejado muchos ciudadanos fuera del acceso a sus derechos laborales y ha puesto en evidencia los impactos de un modelo socioeconómico que no concibe la cura y el desarrollo de las personas como principio básico, en todas sus dimensiones. En este sentido, uno de los principales retos del Consorcio del Besòs es aplicar una estrategia capaz de reactivar una actividad económica y empresarial competitiva, inclusiva y sostenible en el tiempo que sea capaz de continuar con el legado industrial de la gestión de los residuos desde un enfoque sostenible y apostando por una ciudad comprometida con el medio ambiente.

2.5. Marco urbanístico del Litoral del Besòs

2.5.1. El frente del Litoral del Besòs

La ubicación durante décadas de industrias en el tramo de costas (Sant Adrià de Besòs, Badalona y Montgat), entre la línea de tren y el mar, ha hecho que el frente del Litoral Besòs haya vivido dando la espalda a la playa. En el caso de Sant Adrià, dos grandes fábricas han ocupado los terrenos de la primera línea de mar durante más de 60 años al llamado ámbito de las tres chimeneas. Hoy, estas industrias se han trasladado a otros lugares y se encuentran demolidas o en proceso de desmantelamiento. Además, la construcción del colector de Llevant durante los años 80, que linda con las vallas de las industrias y colocado dentro de la zona marítima-terrestre y protegido por un rompeolas, hace que la playa de encuentro fragmentada y con una accesibilidad dificultosa y limitada, generando zonas de degradación y marginalidad. Por otro lado, la creación de los 2 puertos en este litoral (Port del Fòrum y Port de Badalona) ha contribuido en los últimos años a dignificar el diálogo con el mar desde la trama urbana. EN este sentido, la transformación del Canal de Gorg de Badalona también proporciona coherencia en esta voluntad de aproximar el mar a la ciudad. Aunque hace falta comentar que hay una falta de conectividad en el sentido paralelo al mar.

2.5.2. La recuperación de los tramos finales del río Besòs, Parc Fluvial del Besòs

El río Besòs es un verdadero signo de identidad de este fragmento territorial. Durante muchos años, este río ha sido una frontera y un espacio de vertedero. EN el tramo final del Besòs también llegaban los desechos y la extensa contaminación de las empresas que hacían servir el río para arrojar sus residuos. Esto provocó que llegara a obtener la calificación de “alcantarilla” siendo el segundo río más contaminado de Europa después del Rin (Alemania).

Después de la canalización del cauce a raíz de la importante crecida del año 1962, el espacio fluvial llegó a ser un lugar inaccesible, contaminado y una verdadera frontera natural entre sus márgenes. En el año 1996, y gracias a un acuerdo entre todos los ayuntamientos cercanos en el

tramo final de río, se presentó un proyecto de “Recuperación del tramo final del río Besòs” a los fondos de cohesión de la UE. En el año 2001 finalizaban las obras de la 1ª fase, iniciándose una espectacular recuperación ambiental de este tramo. Posteriormente se completaron las dos fases hasta llegar a la desembocadura. El Parc Fluvial del Besòs se ha convertido hoy en día en un espacio de ocio donde destaca la recuperación ambiental y de la biodiversidad espectacular con más de 160 especies de aves censadas, y especialmente en su desembocadura, lugar estratégico, en las migraciones anuales de las aves, pero que a pesar de todo aún hoy hace falta mejorar sus condiciones e interconectar con el frontal litoral y velar por su control y mantenimiento, en este caso con las TIC para su seguimiento y monitorización tanto del río como del delta y sus efectos en el litoral adyacente.

2.5.3. Iniciación de un nuevo proyecto de reforma sostenible del litoral del Besòs, PECT

El proyecto, iniciado en 2017, tiene como objetivo la reforma del litoral del Besòs para conseguir un territorio referente e innovador en el desarrollo sostenible de ciudades metropolitanas en un entorno fluvial y litoral en Cataluña. Para ello, se ha propuesto en esta tesis de máster proponer una metodología de análisis ambiental mediante unos indicadores ambientales aplicados en los últimos años. Una vez validada la metodología propuesta, se aplicará en como análisis de este proyecto.

Se trata de desarrollar y experimentar actuaciones innovadoras con el fin de mejorar la eficiencia energética y ambiental, favorecer una economía baja en carbono y mitigar los efectos del cambio climático en un entorno urbano metropolitano altamente densificado en un contexto de cooperación interinstitucional, empresarial y ciudadano. Tiene prevista su finalización en 2020.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

El objetivo general de la presente tesis es proponer una serie de indicadores y un índice agregado para analizar la calidad ambiental del litoral del río Besòs. Este objetivo se enmarca en la primera etapa del proyecto “Projecte d’Especialització i Competitivitat Territorial (PECT) Litoral Besòs Territori Sostenible” cuya finalidad es la reforma sostenible del litoral. Con este fin, se proponen un conjunto de indicadores ambientales para analizar la situación en los años 2008 y 2011 del estado trófico en el litoral del Besòs y los contaminantes del agua del río, agua del litoral, aguas subterráneas y del aire. Se realiza también una comparativa con los valores obtenidos mediante la misma metodología para los años 2014 y 2017.

Se espera que el conjunto de indicadores propuestos sean un instrumento útil para realizar el análisis y la posterior difusión de la información a la opinión pública, ayudando a describir fenómenos complejos y sintetizando una gran cantidad de datos. Además, los indicadores tienen como función prestar apoyo a la toma de decisiones y aportar transparencia en la información ambiental hacia el público en general [61].

3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

1. Realizar un análisis histórico y geográfico de los contaminantes en agua, en aire y del estado trófico de la zona del Besòs para conocer su evolución y su comportamiento a lo largo de los años de las estaciones de medición analizadas.
2. Proponer indicadores ambientales y un índice general mediante metodologías referenciadas que puedan servir para el análisis de problemáticas ambientales relacionadas con la contaminación del agua, del aire y de estados tróficos.
3. Aplicar indicadores ambientales propuestos mediante la metodología PSR en la zona del Besòs en los años 2008-2011.
4. Aplicar indicadores ambientales propuestos de presión y estado en los años 2014-2017. De esta forma se podrá ver si los indicadores ambientales de la respuesta del sistema son adecuados.
5. Comparar los valores obtenidos para los años 2008 - 2011 con los obtenidos durante el período 2014 – 2017, con el fin de validar la herramienta y proponer elementos de mejora.

4. Metodología

Este estudio se ha fundamentado en metodologías de análisis cuantitativos y cualitativos para determinar los indicadores ambientales.

Primeramente, se han extraído los datos de la zona de estudio disponibles en relación a los contaminantes de agua del litoral, del río y de aguas subterráneas; a los contaminantes del aire; y a la concentración de clorofila. Seguidamente se ha realizado una interpretación de los datos procesados para analizar el comportamiento de forma histórica y geográfica. Finalmente se han propuesto y aplicado a la zona de estudio un conjunto de indicadores ambientales. Tal y como se ha comentado en la Sección 2 y se detalla a continuación, el estudio se ha desarrollado en el litoral del río Besòs.

4.1. Caso de Estudio: EL litoral del río Besòs

La zona de estudio incluye la desembocadura del río Besòs y su litoral. En concreto, en cada una de las estaciones que se visualizan en el mapa representa las ubicaciones de donde se extrajeron los datos según sean datos de contaminación hidrológicos del litoral, río o subterráneos; datos de contaminación del aire; y datos de clorofila-a. Por lo que quedan excluidas las estaciones fuera de este objeto de estudio.

En la figura 2 se puede ver que cada una de las estaciones se ha identificado con una codificación numerada desde B01 hasta B17. Siendo las estaciones B01 y B12 pertenecientes al municipio de Montcada y Reixach; B02 y B13 al municipio de Santa Coloma de Gramanet; B03, B06, B07, B08 y B15 al municipio de Sant Adrià de Besòs; B04, B05 y B14 al municipio de Badalona; y B09, B10, B11, B16 y B17 al municipio de Barcelona.

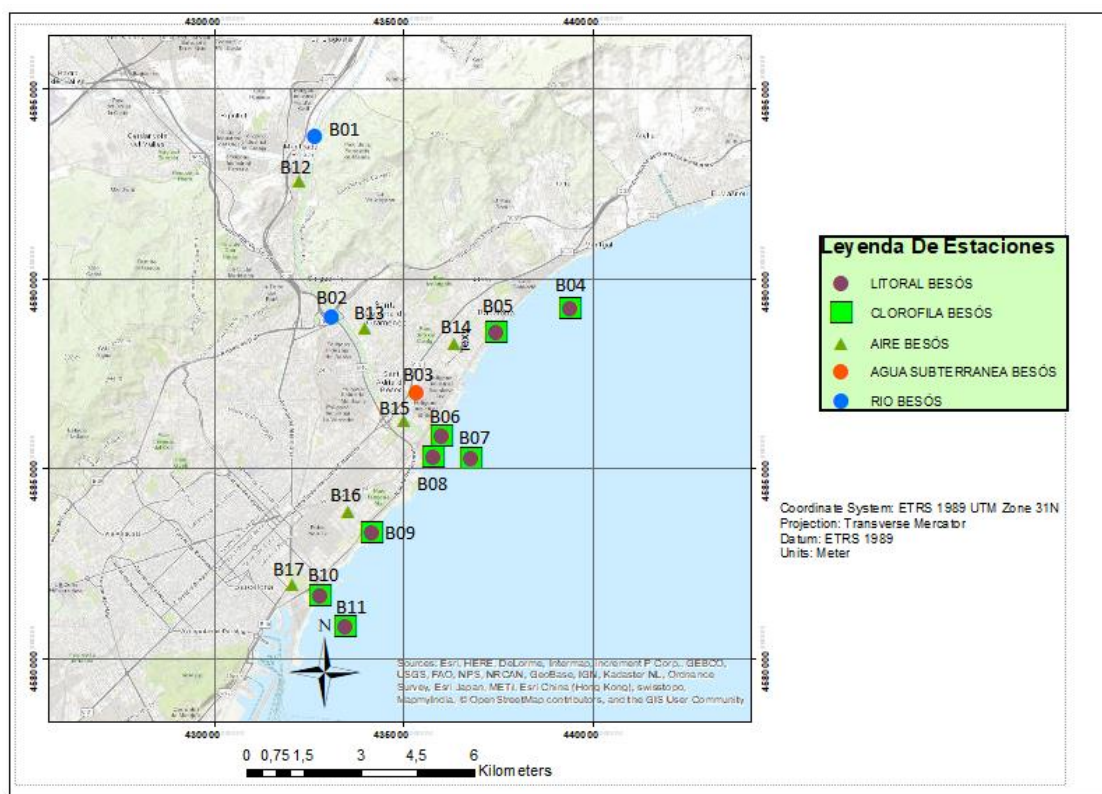


Figura 2. Objeto de estudio de la zona del Besòs.

4.2. Base de datos

La base de datos que se ha utilizado para llevar a cabo este estudio se divide en 3 campos. El primero hace referencia a los contaminantes ubicados en las aguas de la cuenca del Besòs tanto superficial (río y litoral) como subterráneo. El segundo campo hace referencia a los contaminantes del aire de la zona de estudio. El tercer campo hace referencia al estado trófico de la zona de estudio.

Se tomaron datos de las estaciones más cercanas de la desembocadura del río Besòs y de su litoral para determinar los indicadores ambientales de la zona tal y como se muestra en la tabla 2.

La base de datos compuesta por contaminantes del agua fue extraída de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) [74]. Incluye los compuestos descritos en la tabla 2. Se han separado los datos hidrológicos para tres zonas (río, litoral y subterráneo) ya que las órdenes de magnitud son dispares entre ellos y los contaminantes que proporciona la Agència Catalana de l'Aigua son ligeramente diferentes.

En relación a los contaminantes del aire, la información fue proporcionada por el Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Catalunya [75]. Se dispone de información para cuatro contaminantes, según se muestra en la tabla 2.

Con lo que respecta a la base de datos de estado trófico, se ha extraído también del ACA [74]. Se hace referencia a la clorofila-a, siendo éste un buen indicador trófico [57].

Tabla 2. Estaciones y variables químicas de cada indicador.

Indicador	Estaciones	Variables químicas
Calidad hidrología río	B01, B02	Amonio, Cloruros, Nitratos, Nitritos, Sodio
Calidad hidrología litoral	B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10, B11	Amonio, Fosfatos, Nitratos, Nitritos
Calidad hidrología subterránea	B03	Bicarbonato, Calcio, Cloruros, Magnesio, Potasio, Sodio y Sulfatos
Calidad del aire	B12, B13, B14, B15, B16, B17	Dióxido de azufre, Óxido de nitrógeno, Dióxido de nitrógeno, Monóxido de carbono
Calidad - Eutrofización	B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10, B11	Clorofila A

En todas y cada una de las bases de datos se hizo un pretratamiento para filtrar valores que no ofrecían información útil y podrían alterar el análisis tales como valores en formato texto o valores con valores fuera del rango del sensor de la estación. En ambos casos, no se incluyeron en el análisis. Cabe comentar que las extracciones de cada uno de los indicadores fueron a diferentes rangos de año debido a su escasa información.

4.3. Análisis de los datos extraídos

Primeramente, se ha elaborado un análisis histórico de los contaminantes hidrológicos, del aire y el estado trófico para conocer la tendencia a lo largo de los años analizado mediante sus diferentes estaciones. Con este análisis se pretende conocer su evolución.

Seguidamente, se ha analizado el valor de cada contaminante y estado trófico mediante la herramienta ArcGis cuya función ha sido representar geográficamente la información a partir de las bases de datos generadas.

4.4. Indicadores ambientales

Se identifican variables para los indicadores ambientales propuestos en relación a tres estados de una cadena causal: Presión, Estado y Respuesta (ver tabla 3 y figura 3). La ventaja de usar el modelo PSR es la incorporación de la relación causa-efecto, ayudando a los actores y a quienes deben tomar decisiones a ver la interconexión entre estos parámetros.

Inicialmente se han considerado los valores de los contaminantes y de clorofila para los años 2008 y 2011, ya que se trata de los años en los que se pudo obtener más información desde la ACA y la Generalitat de Catalunya. También se ha aplicado la misma metodología de análisis para los años 2014 y 2017, con el fin de conocer la evolución del estado y de la presión del sistema.

De los años escogidos, se ha procedido a realizar la media aritmética anual puesto que hay variación en niveles de contaminantes dependiendo de la estación del año (tal y como se puede ver en el apartado 5.2.). El interés del estudio es evaluar el nivel de contaminación a lo largo de los años, independientemente de la varianza en un mismo año.

Tabla 3. Indicadores y parámetros del índice sostenible.

	PRESIÓN	ESTADO	RESPUESTA
Calidad hidrología río.	Variación de la concentración de los contaminantes en un periodo de años.	Valores de concentración del contaminante en el último año, y comparativa con valores límite de referencia.	
Calidad hidrología litoral.	Variación de la concentración de los contaminantes en un periodo de años.	Valores de concentración del contaminante en el último año, y comparativa con valores límite de referencia.	Programa de monitorización (R1).
Calidad hidrología subterránea.	Variación de la concentración de los contaminantes en un periodo de años.	Valores de concentración del contaminante en el último año, y comparativa con valores límite de referencia.	Intervención y objetivo alcanzado (R2).
Calidad del aire	Variación de la concentración de los contaminantes en un periodo de años.	Valores de contaminantes de un año dentro de unas referencias establecidas por organizaciones.	
Calidad del estado trófico.	Variación de la concentración de clorofila-a en un periodo de años.	Valor de la clorofila en un año.	

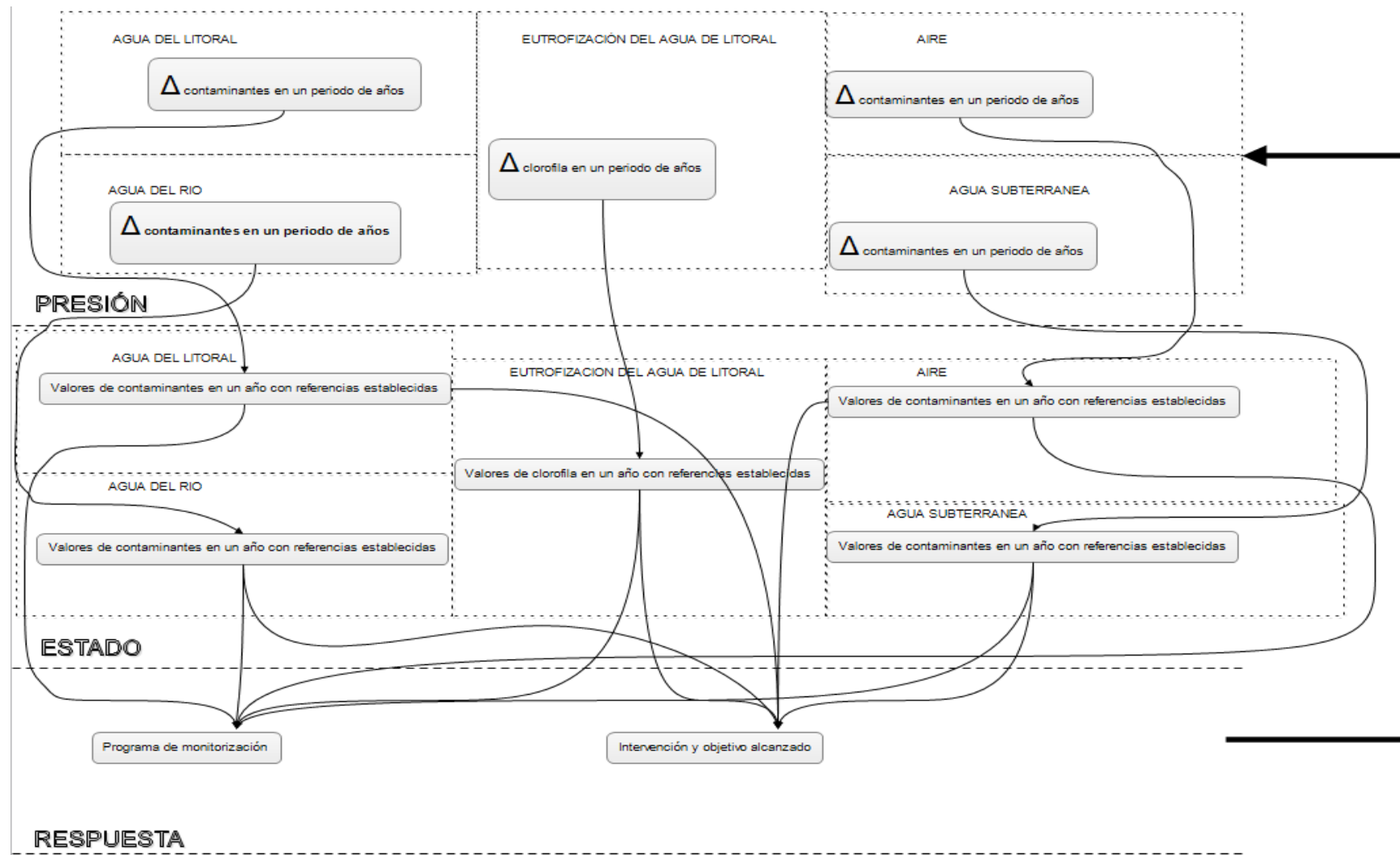


Figura 3. Diagrama relacional de PSR.

4.4.1. La presión del sistema

En lo que se refiere al estado de presión, se sugiere adaptar la propuesta Chaves & Alipaz [62], analizando la variabilidad del contaminante y del estado tráfico en un periodo de tiempo determinado (Tabla 4). Para los indicadores hidrológicos y el indicador de aire, la diferencia de concentración se calcula con respecto al año más actual (mismo año utilizado para los parámetros de estado) para determinar si la concentración ha disminuido (en este caso el valor sería positivo) o ha aumentado (en este caso el valor sería negativo). La diferencia de concentración de clorofila-a en el caso del indicador biológico marino se calcula con respecto al año más antiguo para determinar si la concentración ha disminuido (en este caso el valor sería negativo) o ha aumentado (en este caso el valor sería positivo).

Tabla 4. Ponderación del parámetro presión

Variación de valores entre los dos años propuestos	Ponderación de presión
$\Delta X > 20\%$	1
$10\% < X \leq 20\%$	0,75
$0\% < X \leq 10\%$	0,5
$-10\% < X \leq 0\%$	0,25
$\Delta X < -10\%$	0

Después aplicarse en el intervalo de años del 2008 al 2011, se aplica en el intervalo de años del 2014 al 2017 para comprobar si la respuesta del sistema ha afectado de forma positiva a la presión de dichos intervalos sobre el estado ambiental de la zona.

4.4.2. El estado del sistema

Indicadores hidrológicos del río, litoral y subterráneo: En el caso del estado “estado” para los indicadores hidrológicos, los valores de concentración se han normalizado del 0 al 1, de modo que el más contaminante sea 0 y menos contaminante sea 1, tal y como se puede ver en la tabla 5. Tomando como referencia los valores límite XXX, se aplica la Ecuación 1 siempre y cuando los valores de los contaminantes estén dentro del rango establecido. En caso contrario, si el valor del contaminante sobrepasa el límite superior establecido por la Comisión Europea (OMS en el caso de sólidos disueltos), el valor del indicador pasa a ser automáticamente 0. Si el valor del contaminante sobrepasa el límite inferior establecido en esta tesis, el valor del indicador pasa a ser automáticamente 1. Es necesario comentar que se han seleccionado estos valores debido a la falta de información sobre unos límites establecidos de los contaminantes en masas de agua, por lo que no son límites totalmente adecuados puesto que la descontaminación del río no tiene como objetivo la aptitud del agua para beber sino para la minimización de impacto en la naturaleza.

$$\frac{\text{Valor recomendado} - \text{Valor contaminante}}{\text{Valor recomendado} - \text{Valor mínimo establecido}} \quad (\text{Eq.1})$$

Tabla 5. Descripción de los parámetros hidrológicos, niveles y ponderaciones.

Parámetros hidrológicos	Zona de estudio	Nivel (mg/L)	Ponderación
Amonio	Litoral	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 0,5$	Eq.1
		$0,5 \leq X$	0
	Río	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 0,5$	Eq.1
		$0,5 \leq X$	0
Calcio	Subterráneo	$X \leq 300$	1
		$300 < X < 1200$	Eq.1
		$1200 \leq X$	0
Cloruros	Río y Subterráneo	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 250$	Eq.1
		$250 \leq X$	0
Fosfatos	Litoral	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 2$	Eq.1
		$2 \leq X$	0
Magnesio	Subterráneo	$X \leq 300$	1
		$300 < X < 1200$	Eq.1
		$1200 \leq X$	0
Nitratos	Litoral y Río	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 50$	Eq.1
		$50 \leq X$	0
Nitritos	Litoral y Río	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 0,5$	Eq.1
		$0,5 \leq X$	0
Potasio	Subterráneo	$X \leq 300$	1
		$300 < X < 1200$	Eq.1
		$1200 \leq X$	0
Sodio	Río y Subterráneo	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 200$	Eq.1
		$200 \leq X$	0
Sulfatos	Río y Subterráneo	$X \leq 0$	1
		$0 < X < 250$	Eq.1
		$250 \leq X$	0

Después aplicarse en el año 2011, se aplica en los años 2014 y 2017 para comprobar si la respuesta del sistema ha estado mejorando el estado ambiental de la zona.

Indicadores de contaminación del aire: Los parámetros de estado del indicador del aire están relacionados con los contaminantes mencionados en la tabla 6 de los que tienen establecidos unos valores límite de contaminante tal y como se imponen en la Real Decreto 102/2011 [76].

$$\frac{\text{Valor límite por la Real Decreto 102/2011} - \text{Valor contaminante}}{\text{Valor límite por la Real Decreto 102/2011} - \text{Valor mínimo establecido}} \quad (\text{Eq.2})$$

Los parámetros de estado del indicador del aire, se ha normalizado del 0 al 1 haciendo que lo que es más contaminante sea 0 y lo menos contaminante sea 1 tal y como se puede ver en la tabla 7. Por lo que se aplica la ecuación Eq.2 siempre y cuando los valores de los contaminantes estén dentro del rango establecido. En caso contrario, si el valor del contaminante sobrepasa el límite superior establecido según la Directiva 2008/50/CE y el Real Decreto 102/2011, el valor del indicador pasa a ser automáticamente 0. Si el valor del contaminante es sobrepasa el límite inferior establecido en esta tesis, 0, el valor del indicador pasa a ser automáticamente 1.

Los límites establecidos por el Real Decreto 102/2011 se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Límite del valor de contaminante establecido por la Real Decreto 102/2011

Contaminante	Límite del valor de contaminante (LVC)
Dióxido de azufre	125 µg/m ³
Ozono	120 µg/m ³
Óxido de nitrógeno	40 µg/m ³
Dióxido de nitrógeno	40 µg/m ³
Monóxido de carbono	10 mg/m ³

Tabla 7. Descripción de los parámetros del aire, niveles y ponderaciones.

Parámetros hidrológicos	Nivel ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹	Ponderación
Dióxido de azufre	$X \leq 0$	1
	$0 < X < 125$	Eq.2
	$125 \leq X$	0
Monóxido de nitrógeno	$X \leq 0$	1
	$0 < X < 40$	Eq.2
	$40 \leq X$	0
Dióxido de nitrógeno	$X \leq 0$	1
	$0 < X < 40$	Eq.2
	$40 \leq X$	0
Monóxido de carbono	$X \leq 0$	1
	$0 < X < 10$	Eq.2
	$10 \leq X$	0

¹ Excepto el monóxido de carbono cuyas unidades son mg/m^3 .

Indicador de estado trófico: El indicador de estado trófico corresponde al promedio anual de la biomasa de clorofila-a. Carlson [57] demostró en el año 1977 que existe una relación directa de eutrofización con la concentración de clorofila-a mediante el índice de estado trófico (TSI). La normativa de referencia de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) clasifica el estado trófico de los sistemas según la concentración de clorofila-a en las categorías que se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Niveles y ponderaciones de los parámetros biológicos [77].

Parámetros de estado trófico	Nivel (mg/m^3)	Ponderación
Clorofila-a	Hipereutrófico : $75 \leq X$	0
	Eutrófico: $25 \leq X < 75$	0,25
	Mesotrófico: $8 \leq X < 25$	0,5
	Oligotrófico: $2,5 \leq X < 8$	0,75
	Ultraligotrófico: $X < 2,5$	1

4.4.3. La respuesta del sistema

Los parámetros de respuesta se dividieron en dos tipos de los cuales aplican por igual a cada indicador tal y como se muestra en la tabla 9. La ponderación de los parámetros para el estado de respuesta se mide mediante el análisis cualitativo del programa de monitorización y la

monitorización en sí de la zona o todas sus estaciones; y mediante la existencia de intervenciones y objetivos alcanzados.

En el primer parámetro, si existe un programa de monitorización que actúe sobre los valores que se desean analizar y se realiza en todas sus estaciones, se pondera con el valor 1. En el caso que no exista un programa de monitorización se pondera como 0.

En el segundo parámetro, si existe como mínimo una intervención y en esas intervenciones se hayan cumplido los objetivos, se pondera con valor 1. En el caso que exista como mínimo una intervención pero no haya cumplido los objetivos propuestos, se pondera como un 0,5. Si no aplica ninguno de los dos casos, se pondera como 0.

Tabla 9. Ponderación del parámetro respuesta.

Parámetro	Actuación	Ponderación de respuesta
Monitorización	Programa de monitorización	1
	Nada	0
	Intervención + Objetivos	1
Intervención y objetivos	Intervención	0,5
	Nada	0

4.5. Índices ambientales

En términos del método de agregación, se parte de la propuesta de dos métodos: la media geométrica (aplicada p.ej. por Pérez y Giné [76]) y la media aritmética (aplicada por Chaves y Alipaz [62]).

Primeramente se propone hacer una media aritmética de los indicadores ambientales para generar índices de cada estación de la zona del litoral, del río, del subterráneo y del aire además de la clorofila. Se hace este cálculo ya que se considera cada indicador con un mismo peso. De esta manera se tiene un único valor representativo por estación para cada índice.

A continuación, se agregan los 3 parámetros (Presión, Estado, Respuesta) por cada índice (IV_i , i =Litoral, L; Río, R; Subterráneo, SB; Aire, A; Bio, B) aplicando la media geométrica, $IV1$, tal y como se presenta en la Ecuación 5; y la media aritmética, $IV2$, tal y como se muestra en la Ecuación 6. Se aplica la geométrica y la aritmética para analizar el valor de la agregación de la presión, estado y respuesta con pesos diferentes y con pesos iguales respectivamente.

$$IV1_j = \sqrt[5]{\prod_{i=L,R,SB,A,B} X_i} \quad (\text{Eq.3})$$

$$IV2_j = \frac{1}{5} \sum_{i=L,R,SB,A,B} X_i \quad (\text{Eq.4})$$

5. Resultados

Antes de la aplicación de los indicadores ambientales propuestas para la zona de estudio, se ha realizado un previo estudio de los contaminantes en aguas subterráneas, en río y en litoral y del estado trófico del litoral para determinar su tendencia histórica para situar al lector de la problemática de la desembocadura del Besòs. Seguidamente, se ha realizado una representación geográfica de los años 2008 y 2011. De esta forma, el lector tiene una comparativa de los contaminantes por cada estación de la zona de estudio. A continuación, se hace un sencillo tratamiento estadístico para analizar el comportamiento de los datos extraídos en cada estación y de cada indicador. Posteriormente, se muestran los resultados de los parámetros presión, estado y respuesta de cada uno de los indicadores. Seguidamente, se aplica el índice propuesto en la metodología. Finalmente se aplican los indicadores ambientales a la situación ambiental más reciente (2017) del Besòs.

5.1. Tendencia temporal de los datos extraídos

A continuación se muestran análisis históricos de los contaminantes hidrológicos, del aire y del estado trófico. En Anexo I, Anexo II y Anexo III se encuentran más análisis históricos del objeto de estudio de diferentes años.

5.1.1. Contaminantes hidrológicos del litoral

En la figura 4 se muestran 4 gráficas que representan el comportamiento de los contaminantes de amonio, fosfatos, nitratos y nitritos entre los años 1997 y 2012 de las estaciones B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10 y B11. En todos los años se aplicó la media aritmética para tener un valor representativo anual por contaminante y estación.

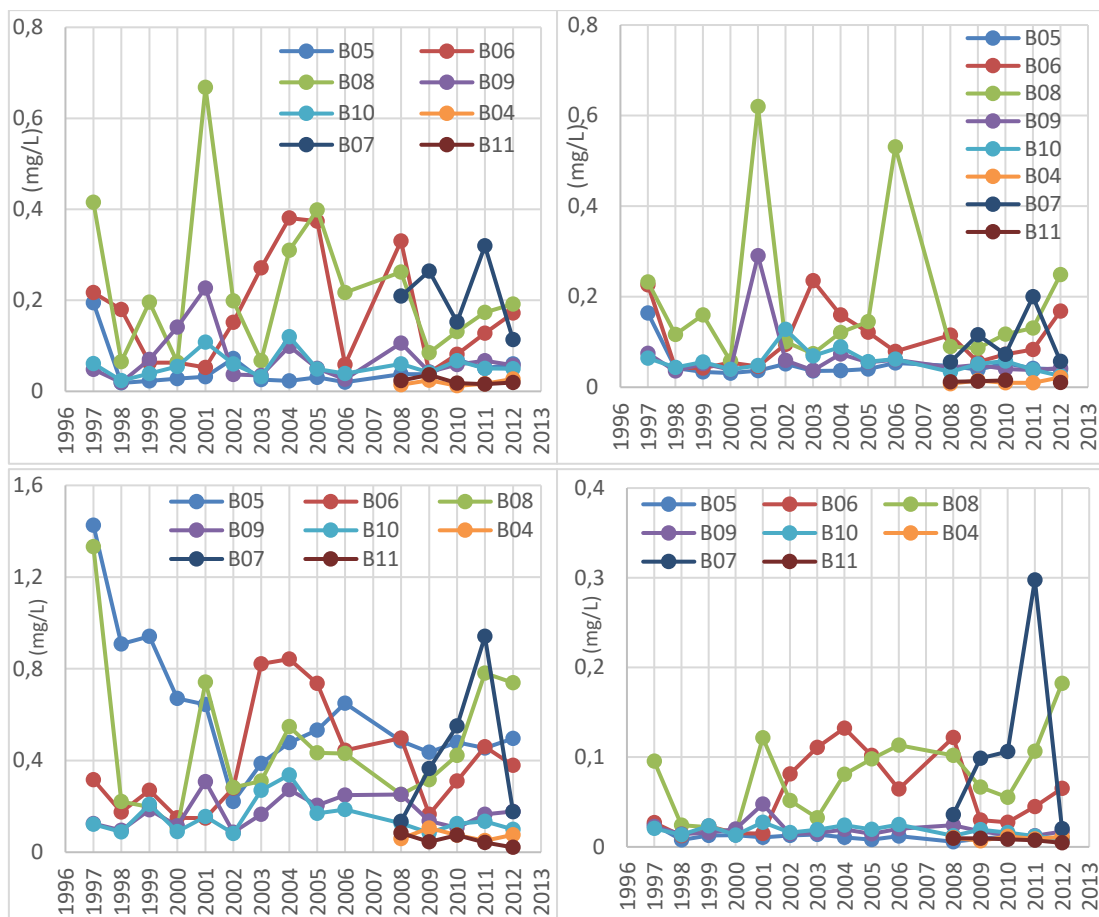


Figura 4. Histórico de los contaminantes hidrológicos del litoral del Besòs. Imagen superior izquierda: Amonio (mg/L). Imagen superior derecha: Fosfatos (mg/L). Imagen inferior izquierda Nitratos (mg/L). Imagen inferior derecha: Nitritos (mg/L).

En la gráfica superior izquierda, se representa el comportamiento del contaminante amonio. No existe una tendencia clara de este contaminante en ninguna estación. Pero se puede ver que el amonio en el año 2001 en la estación B08 alcanzó un valor de 0,67 mg/L siendo éste el valor más alto registrado en la zona del Besòs y el único que superó el límite establecido (0,50 mg/L). Excepto en la estación B08, se pueden ver que el valor de amonio de cada estación ha oscilado dentro de los márgenes permitidos en esta tesis.

En la gráfica superior derecha, se representa el comportamiento del contaminante fosfato del que tampoco existe una tendencia clara en ninguna estación. En la estación B08, se volvió a registrar el valor más alto en la zona del Besòs, 0,619 mg/L siendo más del doble del valor máximo de la segunda estación más contaminante (B09). Pero en ningún caso se sobrepasó el límite establecido (2 mg/L). Excepto en la estación B08, se puede ver que el valor de fosfato de cada estación ha oscilado entre los valores de 0 mg/L y 0,30 mg/L.

En la gráfica inferior izquierda, se visualiza el comportamiento del contaminante nitrato a lo largo de los años. No existe una tendencia clara pero se puede ver que en ninguna de las estaciones se sobrepasó el límite establecido (50 mg/L). La estación B05 alcanzó el máximo registrado de estos años con un valor de 1,43 mg/L.

En la gráfica inferior derecha se puede ver el comportamiento del contaminante nitrito cuyo valor máximo fue 0,297 mg/L situándose en la estación B07 en el año 2011. En ningún caso sobrepasó el valor máximo establecido (0,50 mg/L).

En general, se puede ver una relación directamente proporcional de entre los 4 contaminantes por cada estación ya que un contaminante en una estación ha tenido el mismo comportamiento que otro contaminante en la misma estación. En cambio, el mismo contaminante no ha reflejado el mismo comportamiento en diferentes estaciones.

5.1.2. Contaminantes hidrológicos del río

En la figura 5 se muestran 2 gráficas que representan el comportamiento de los contaminantes de amonio, cloruro, nitratos, nitritos, sodio y sulfato entre los años 1996 y 2017 de las estaciones B01 y B02 situadas en el último tramo del río Besòs. En todos los años se aplicó la media aritmética para tener un valor representativo anual por contaminante y estación.

La gráfica superior representa el comportamiento de los contaminantes en la estación B01. Tal y como se puede ver, entre los años 1997 y 2002 se obtuvieron los mayores registros de contaminantes en la estación B01. El contaminante con mayor registro de concentración en la estación B01 es el cloruro con un valor de 509,12 mg/L en el año 2001. El orden de magnitud de los contaminantes de cloruro, sodio y sulfatos ha sido mayor de 100 mg/L. En cambio, el orden de magnitud de amonio, nitritos y nitratos ha sido menor 35 mg/L con unos valores de amonio similares a los del nitrato a diferencia de los valores de nitrito que oscilan entre 5 mg/L y 0 mg/L.

La gráfica inferior muestra el comportamiento de los contaminantes en la estación B02. A diferencia de la estación B01, existen datos a partir del año 2008 ya que fue cuando empezó a realizarse el monitoreo de la estación. Los contaminantes de cloruro, sodio y sulfatos han tenido valores mayores de 100 mg/L. En cambio, los valores de nitritos, nitratos y amonio han tenido valores menores a 30 mg/L. No se aprecia una tendencia en los contaminantes, pero se puede decir que la concentración del contaminante del cloruro ha sido históricamente mayor que los demás.

En general se puede ver que el contaminante cloruro ha tenido los valores más altos en ambas estaciones seguido del sodio y de sulfatos. En el año 2014 están los valores más bajos y a partir

de ese mismo año tiene una tendencia creciente hasta 2016, cuando empieza a disminuir de nuevo.

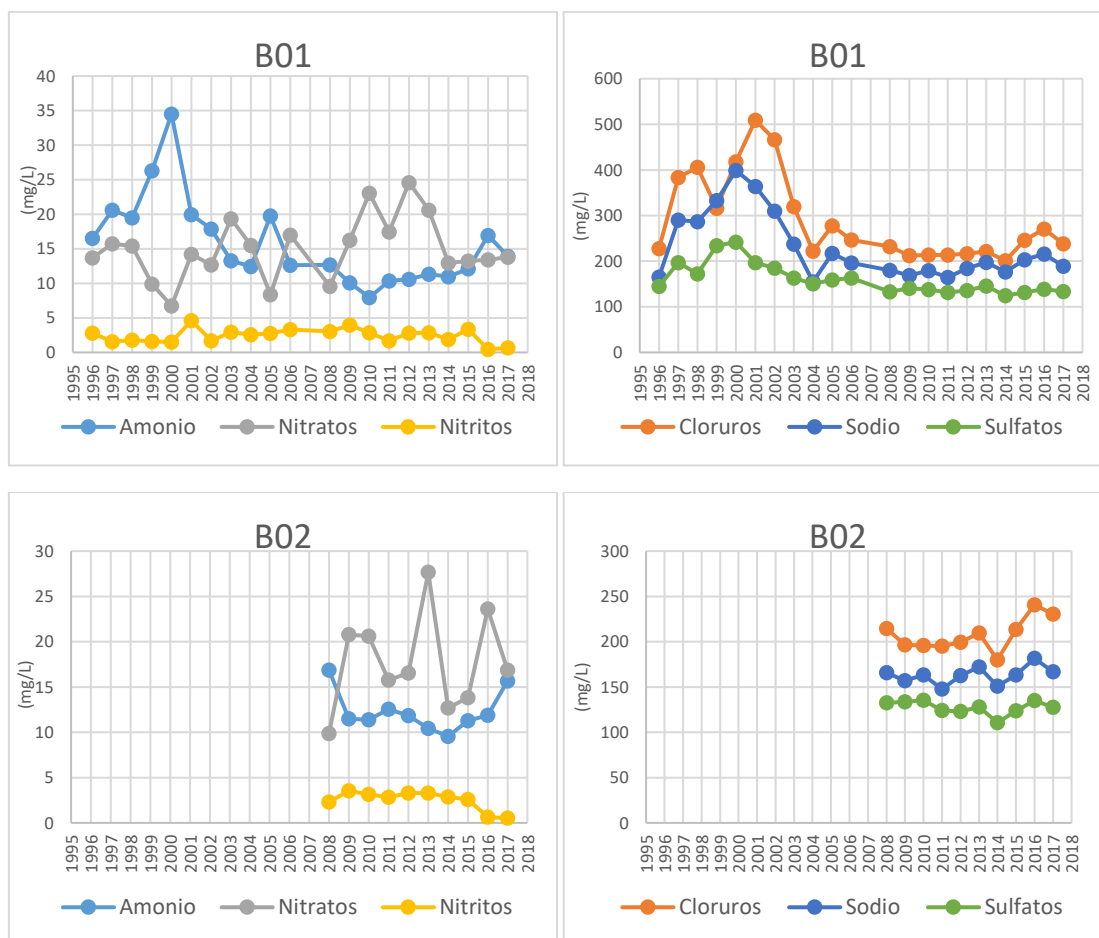


Figura 5. Histórico de los contaminantes hidrológicos del río. Imágenes superiores: Estación B01. Imágenes inferiores: Estación B02.

5.1.3. Contaminantes hidrológicos subterráneos

La figura 6 representa el comportamiento de los contaminantes de amonio, cloruros, nitratos, nitritos, sodio y sulfatos en la estación B03 de entre los años 2008 y 2015. Se puede ver una tendencia de decreciente de todos los contaminantes a medida que han ido pasando los años disminuyendo de valores máximos de 600 mg/L a 150 mg/L en 7 años sin considerar el contaminante bicarbonato que ha disminuido hasta 400 mg/L aproximadamente. Se puede ver que el bicarbonato ha sido el contaminante con los valores más altos históricamente en esta estación.

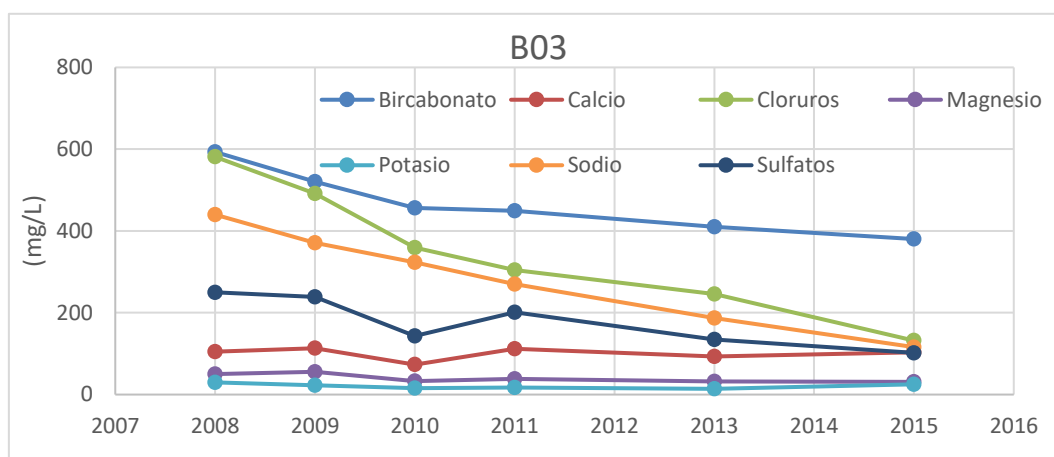


Figura 6. Historial de los contaminantes de aguas subterráneas de la estación B03.

5.1.4. Contaminantes del aire

Con lo que respecta a los contaminantes del aire, se han representado 6 gráficas de las que describen el comportamiento de los contaminantes de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, ozono, monóxido de carbono y partículas pequeñas de diámetro 10 micrómetros en cada una de las estaciones (una estación por gráfica) con valores registrados desde el año 2004 hasta el año 2017.

En la imagen superior izquierda de la figura 7 se puede visualizar las tendencias de los contaminantes de la estación B15. Los valores de los contaminantes de dióxido de nitrógeno, ozono, PM10 y óxido de nitrógeno han oscilado entre $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cambio, el valor del contaminante dióxido de azufre no supera históricamente el valor de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No se tiene una clara tendencia en los contaminantes del aire. Pero se puede decir que el monóxido de carbono ha aumentado desde el año 2004 al año 2011 de $0,3 \text{ mg}/\text{m}^3$ a $0,55 \text{ mg}/\text{m}^3$ aproximadamente.

En la imagen superior derecha de la misma figura se representa los contaminantes de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, ozono y monóxido de carbono de la estación B15. Hace falta comentar que los valores del año 2008 son anormales ya que sólo se obtuvieron valores de los últimos meses que corresponden a las estaciones de otoño e invierno cuyas estaciones afectan en la presencia de contaminantes del aire (ver figura 9). Los valores de los contaminantes no superan los $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y tampoco se aprecia una tendencia clara. En cambio, los valores de dióxido de azufre no superan los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la imagen inferior de la figura, se pueden ver discontinuidades claras en los valores históricos debido a que el monitoreo de la estación B16 no fue de manera continuada en los diferentes contaminantes. Se puede apreciar que no existe una tendencia clara en ningún contaminante. Todos los valores excepto el monóxido de carbono oscilan entre los $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del monóxido de carbono oscila entre $0,55 \text{ mg}/\text{m}^3$ y $0,35 \text{ mg}/\text{m}^3$.

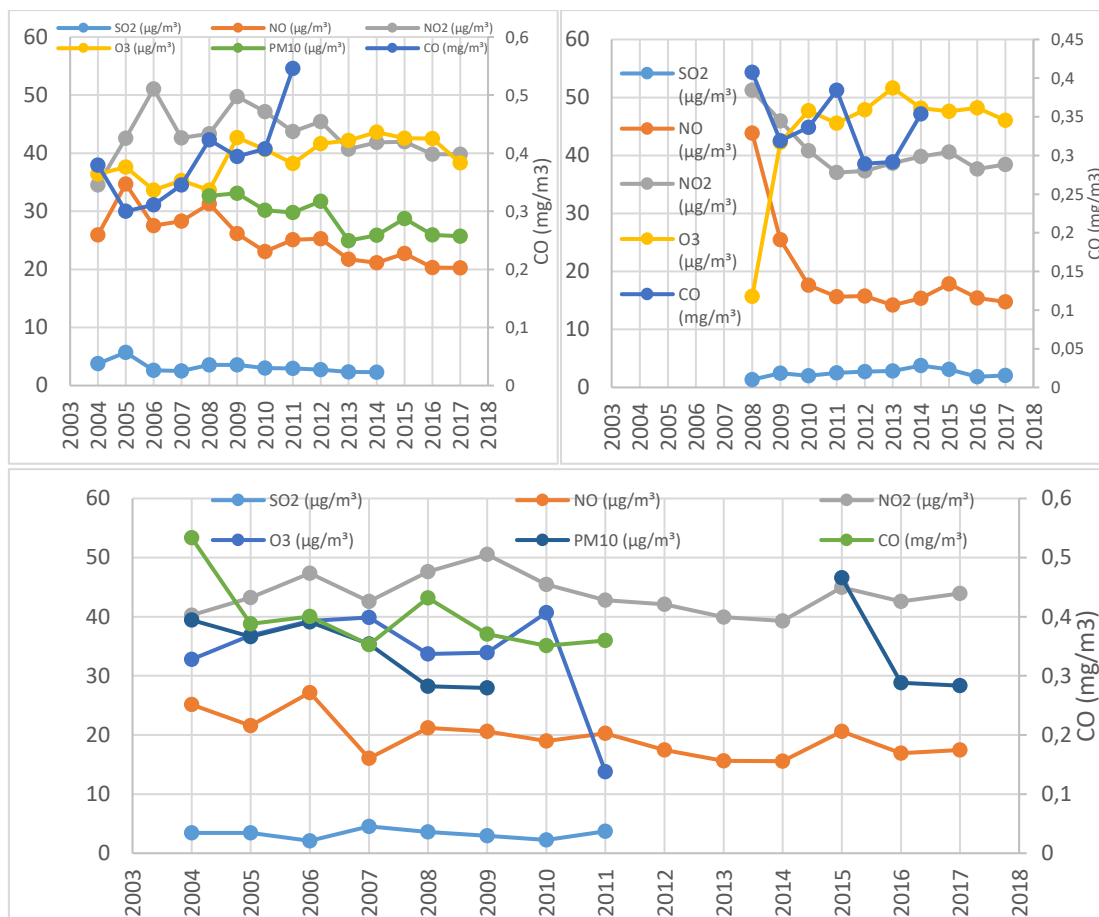


Figura 7. Histórico de los contaminantes de aire. Imagen superior izquierda: Estación B15. Imagen superior derecha: Estación B14. Imagen inferior: Estación B16.

En la imagen superior izquierda de la figura 8 se representa el comportamiento de cada contaminante analizado en la estación B17. En general no se aprecia ninguna tendencia de cada composición química. Los valores de dióxido de nitrógeno y ozono son muy similares históricamente oscilando entre $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, se puede ver que el óxido de nitrógeno oscila entre 10 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el dióxido de azufre no supera los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente se puede ver que el monóxido de carbono no sobrepasa de los $55 \text{mg}/\text{m}^3$.

En la imagen superior derecha de la misma figura muestra la tendencia en la estación B13 de los mismos contaminantes mencionados previamente. No se aprecia ninguna tendencia clara. El dióxido de azufre es el contaminante con los valores más pequeños registrados en la estación. En cambio, los valores de dióxido de nitrógeno, monóxido de nitrógeno y ozono oscilan en el mismo rango de datos. Por lo que al monóxido de carbono se refiere, oscila entre los valores de $0,3 \text{mg}/\text{m}^3$ y $0,7 \text{mg}/\text{m}^3$.

En todas y cada una de las gráficas, se puede ver que el monóxido de carbono es el contaminante con mayores valores en cada estación, a diferencia del dióxido de azufre siendo el contaminante con los menores valores en cada estación.

Además de las representaciones históricas anuales de cada estación, se ha querido poner especial interés en la variación de los contaminantes de los óxidos nitrosos y el ozono según la época del año en el que se sitúan.

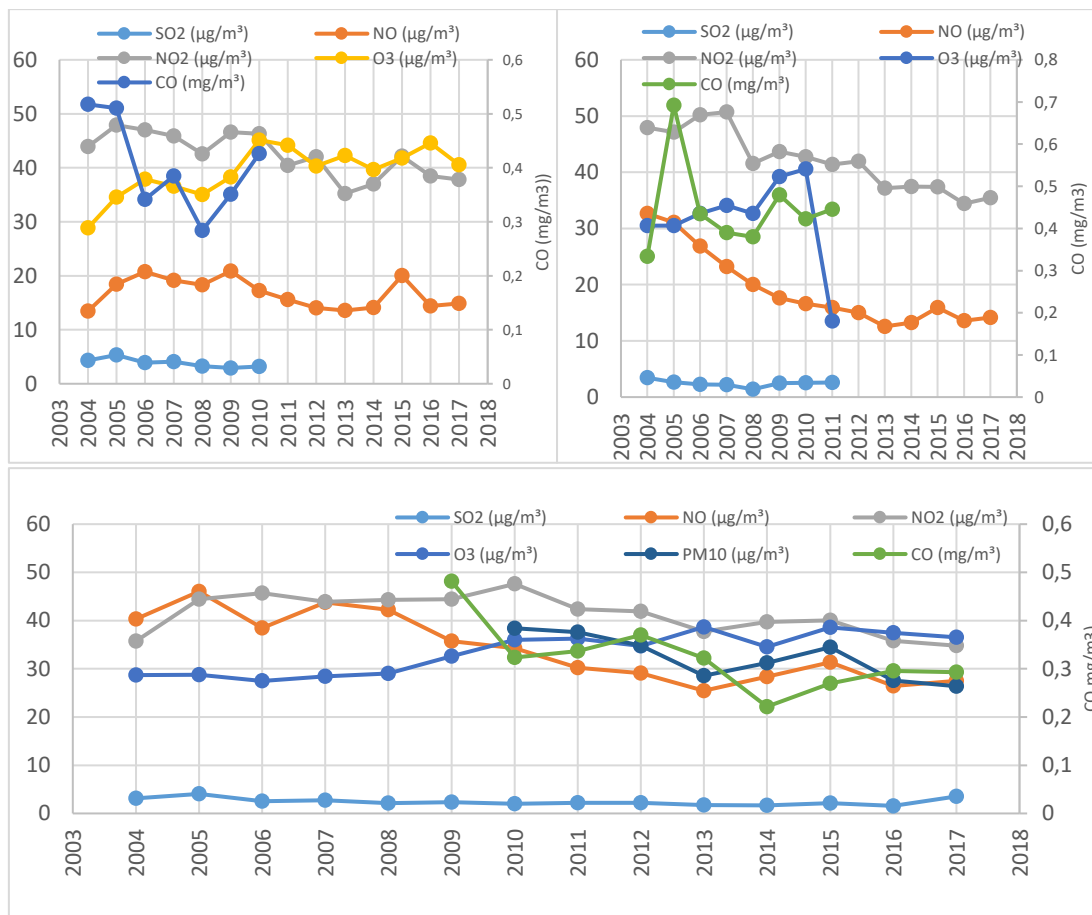


Figura 8. Histórico de los contaminantes de aire. Imagen superior izquierda: Estación B17. Imagen superior derecha: Estación B13. Imagen inferior: Estación B12.

En la figura 9 se representa el comportamiento del óxido de nitrógeno y del ozono de la estación B15 en la que se puede ver que los niveles más altos de ozono son en verano y los puntos más altos de óxido de nitrógeno son en invierno. Esto se explica debido a su reacción endotérmica formándose así el llamado smog en las zonas urbanizadas.

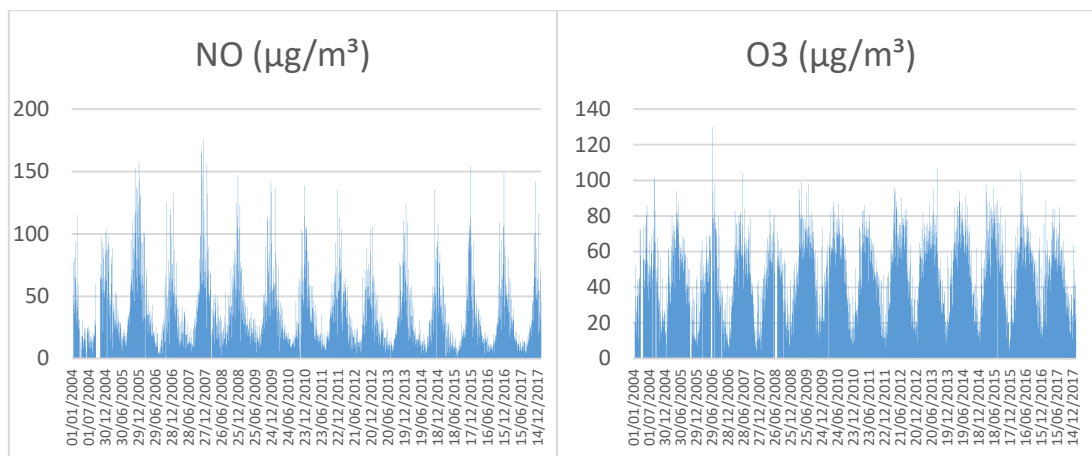


Figura 9. Histórico de los valores de los contaminantes NO y O3 de la estación B15.

5.1.5. Estado trófico

En la figura 10 se representa la evolución de la cantidad de clorofila-a desde el año 1997 hasta el año 2012 de las estaciones B05, B06, B07, B08, B09, B10 y B11. Hay que comentar que hubieron estaciones que empezaron en el año 2008, por lo que no se tienen registros de las mismas en años anteriores. Se puede ver que el punto más alto de clorofila en la mayoría de las estaciones fue en el año 2001. Se puede interpretar que ha disminuido el nivel de clorofila-a desde el año 1997 hasta el año 2012. El punto más alto de clorofila-a se registró en la estación B09 en el año 2001 con casi 6 mg/m³. Hasta el año 2001, la cantidad de clorofila-a sobrepasaba 2 mg/m³, aunque desde el año 2002 la cantidad nunca ha superado dicho valor.

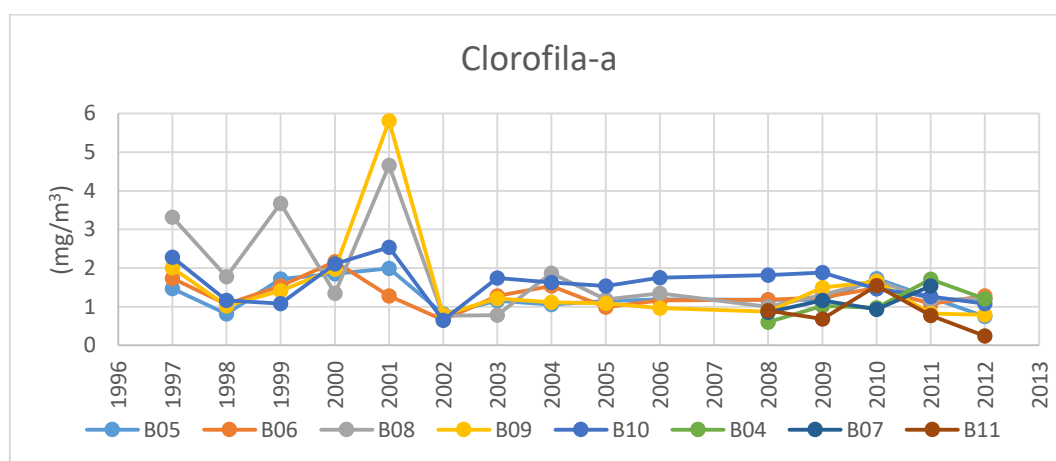


Figura 10. Histórico del estado trófico mediante la clorofila-a.

5.2. Análisis geográfico de los datos extraídos

Los siguientes mapas fueron desarrollados con el software ArcGis mediante la información extraída mencionada en la metodología. Para hacer un análisis histórico entre dos años, se hizo

la media anual de cada uno de los contaminantes de agua, contaminantes de aire y de clorofila-a en cada estación. En Anexo I, Anexo II y Anexo III se encuentran más análisis geográficos del objeto de estudio de diferentes años.

5.2.1. Contaminación del agua

Litoral Besòs

Tal y como se puede ver en las figuras 11 y 12, las mayores concentraciones de los contaminantes amonio, fosfatos, nitratos y nitritos en los años 2008 y 2011 se sitúan en la desembocadura del Besòs. Esto se debe a la cantidad de contaminantes que arrastra el cauce tiene como posible origen en los procesos industriales o del producto del metabolismo de los seres vivos.

Se aprecia en la figura 11 que las concentraciones más altas fueron la de los contaminantes de amonio y nitratos en el año 2008. También cabe mencionar que las concentraciones más altas de nitrato no sólo se encontraron en la estación situada en el litoral de Badalona (B05) sino en la estación B06 situada en el litoral de Badalona.

En las 3 estaciones situadas en el litoral de Barcelona, el contaminante más abundante es el nitrato seguido del amonio. Son las estaciones analizadas con menos contaminantes junto con la estación B04.

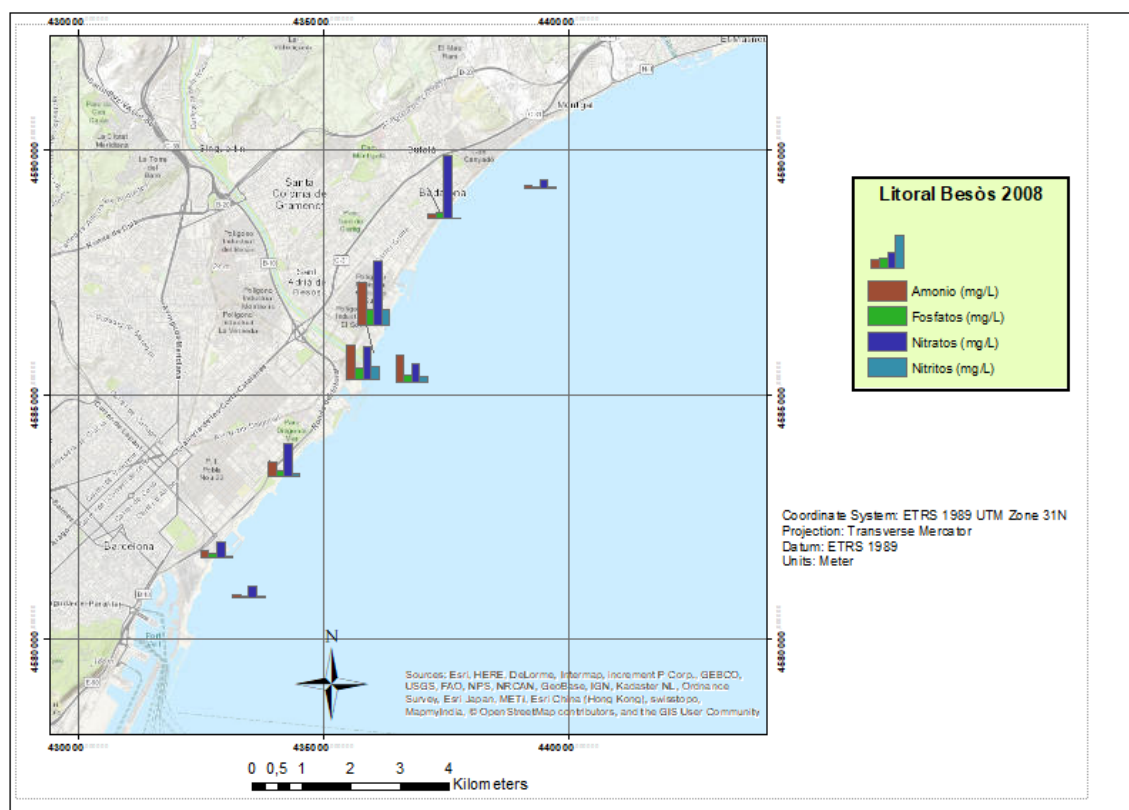


Figura 11. Contaminantes de las estaciones del litoral Besòs 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

En la figura 12 se aprecia que en el año 2011, el contaminante que más destacó fue el nitrato situado en gran cantidad en la desembocadura del río y en la estación B05. Destaca la gran disminución de amonio situándose en valores similares a los otros contaminantes analizados.

En las 3 estaciones situadas en el litoral de Barcelona fueron las menos contaminantes junto con la estación B04 del litoral de Badalona. En cambio, las 3 estaciones situadas en la desembocadura fueron las más contaminantes de las estaciones analizadas.

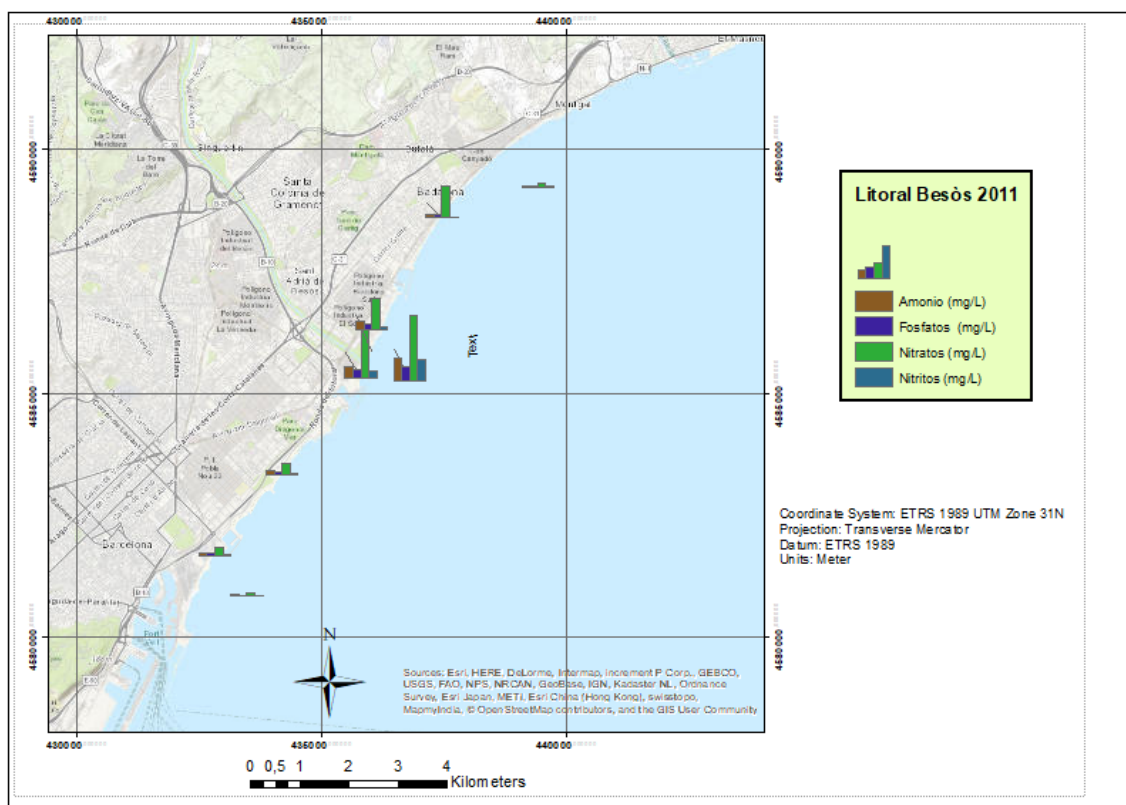


Figura 12. Contaminantes de las estaciones del litoral Besòs 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

Haciendo una comparación histórica de entre los dos años estudiados, se puede ver que los contaminantes de las estaciones analizadas en el litoral han disminuido a diferencia de la estación B07 de la que se aprecia un aumento considerable de los contaminantes además del aumento del contaminante nitrato en la estación B08.

Río Besòs

En el estudio de los contaminantes de las estaciones B01 y B02 ubicadas a lo largo del río Besòs entre Montcada y Reixac y Santa Coloma de Gramanet de los años 2008 y 2011 se analizaron los contaminantes de amonio, cloruros, nitratos, nitritos, sodio y sulfatos. Las sustancias químicas que predominan en las dos estaciones del río son los cloruros, sodio y sulfatos tal y como se puede ver en las figuras 13 y 14.

No se aprecia una variación significativa entre los valores de los contaminantes de los años 2008 y 2011.

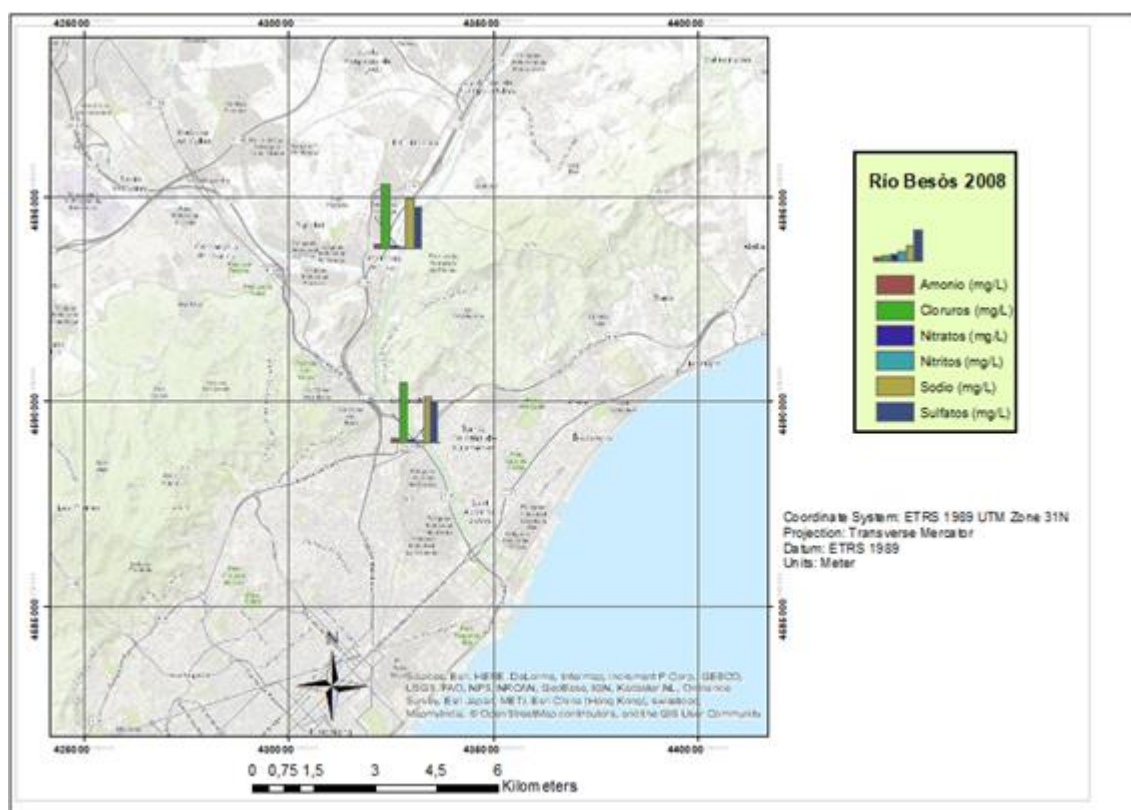


Figura 13. Contaminantes de las estaciones del río Besòs 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

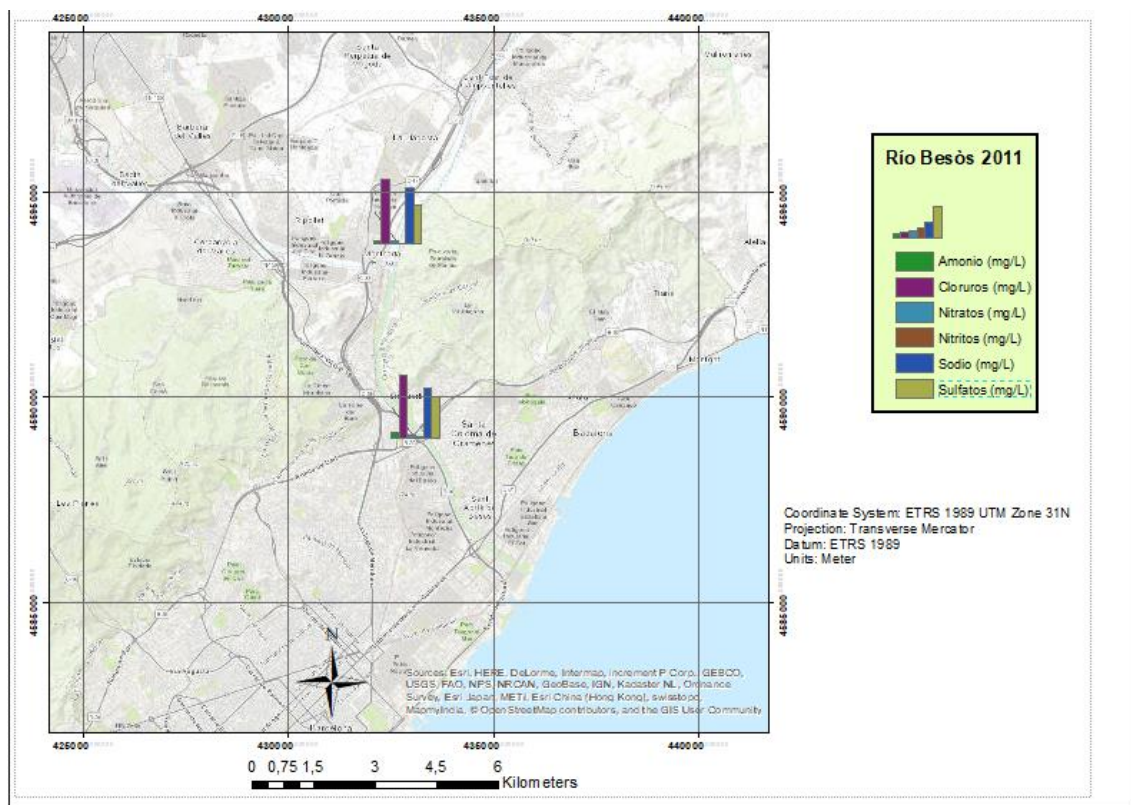


Figura 14. Contaminantes de las estaciones del río Besòs 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

Aguas subterráneas

En el estudio de contaminantes en aguas subterráneas sólo se pudo encontrar una estación situada en la zona de objeto de estudio. Los contaminantes analizados fueron el bicarbonato, calcio, cloruros, magnesio, potasio, sodio y sulfatos. Entre ellos, los contaminantes que destacan son el bicarbonato, cloruros, sodio y sulfatos (ver figuras 15 y 16).

Se puede apreciar una disminución de concentración de cloruros. En los demás contaminantes no se aprecia una variación significativa en su concentración entre los años estudiados.

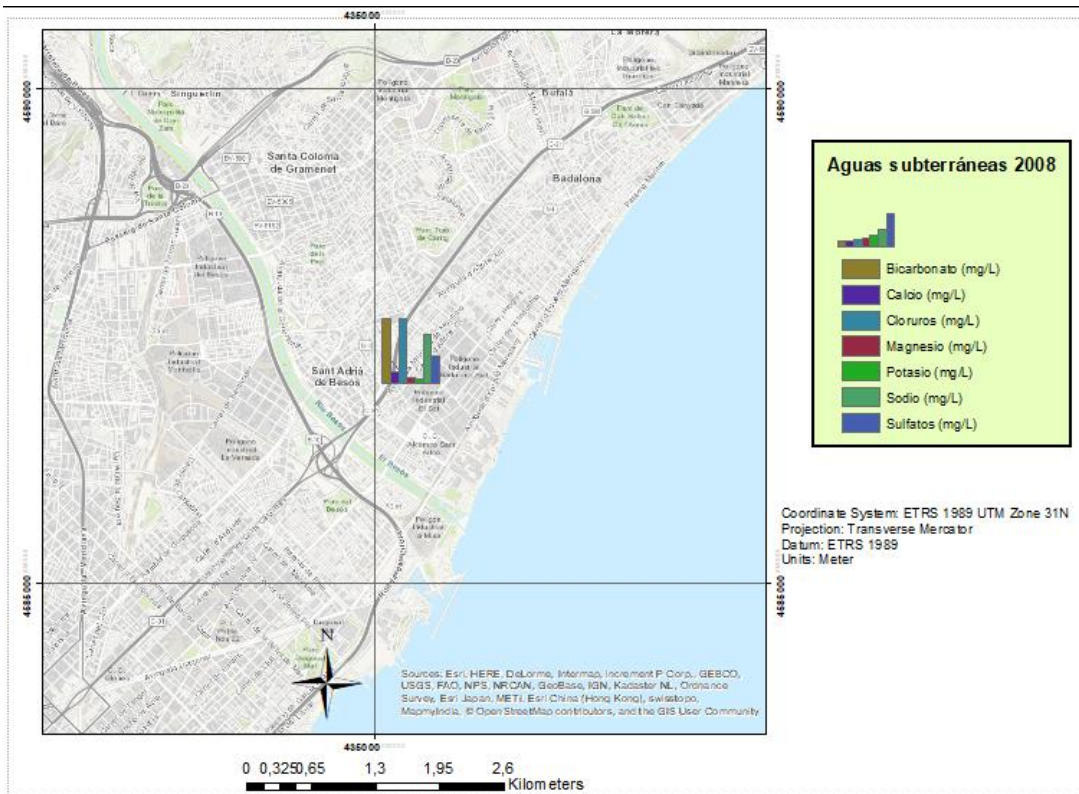


Figura 15. Contaminantes de la estación de aguas subterráneas 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

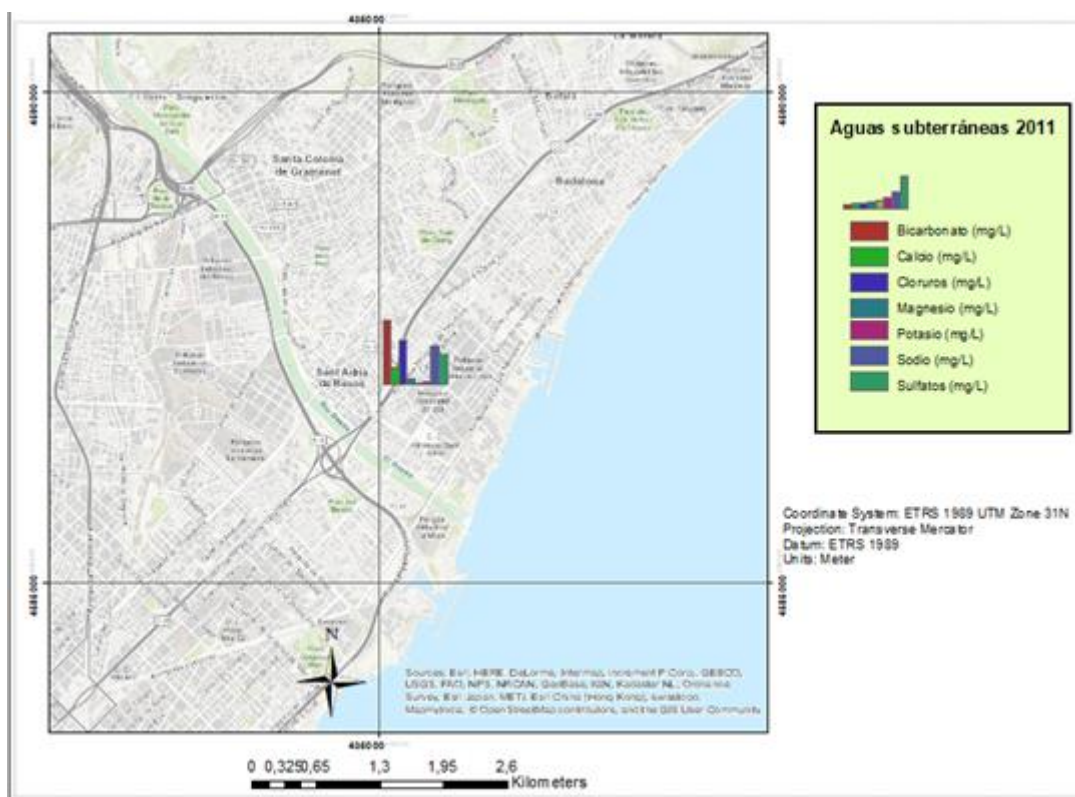


Figura 16. Contaminantes de la estación de aguas subterráneas 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

5.2.2. Contaminación del aire

Con lo que respecta a la problemática de la contaminación aérea, se puede ver en la figura 17 que las concentraciones de dióxido de azufre, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno en las estaciones analizadas son similares. En cambio, las concentraciones de ozono, monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno son las predominantes en las estaciones. También cabe comentar que las concentraciones de monóxido de nitrógeno son mayores en las estaciones de Badalona, Sant Adrià del Besòs i Montcada. Esto puede deberse a que en esas zonas hay más industria que produce combustión y es liberada en forma de monóxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno se encuentra en mayor concentración que el monóxido de nitrógeno ya que puede formarse a partir del calentamiento de nitratos de metales pesados y a partir de la disolución de metales en ácido nítrico. En cambio, el monóxido de nitrógeno puede formarse principalmente por la combinación del propio dióxido de nitrógeno con agua o por la reacción de las moléculas de nitrógeno y oxígeno.

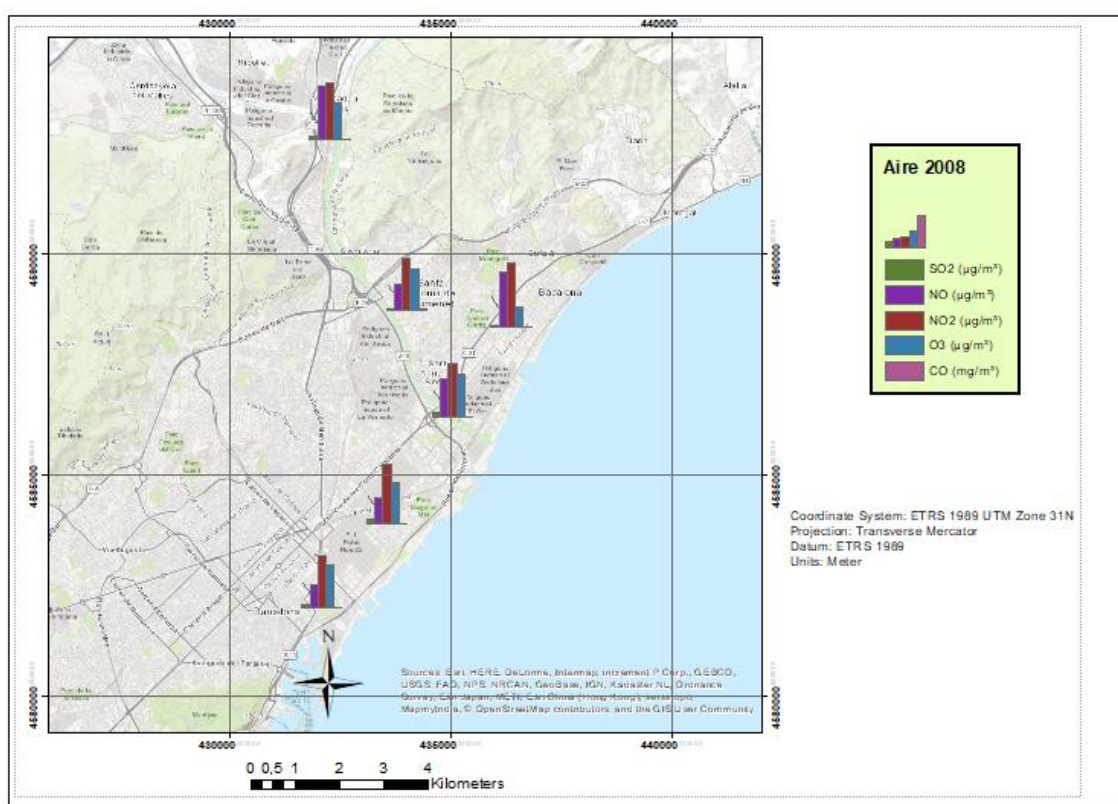


Figura 17. Contaminantes de las estaciones de aire 2008. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos GenCat.

Se aprecia en la figura 18 una vez más que las concentraciones de monóxido de nitrógeno u dióxido de nitrógeno son las que predominan en las estaciones debido a las combustiones que se realizan en las industrias además de la contaminación que liberan los vehículos debido a una combustión incompleta de los hidrocarburos.

Las zonas donde mayor concentración de NO_x (NO₂+ NO) hay son en Montcada y en Sant Adrià de Besòs ya que es donde predomina la industrialización. En cambio, Badalona ha disminuido sus emisiones de Nox posiblemente por el desmantelamiento de la industria o por una disminución de circulación de vehículos de la zona. En general, ha disminuido la concentración de Nox en todas las estaciones.

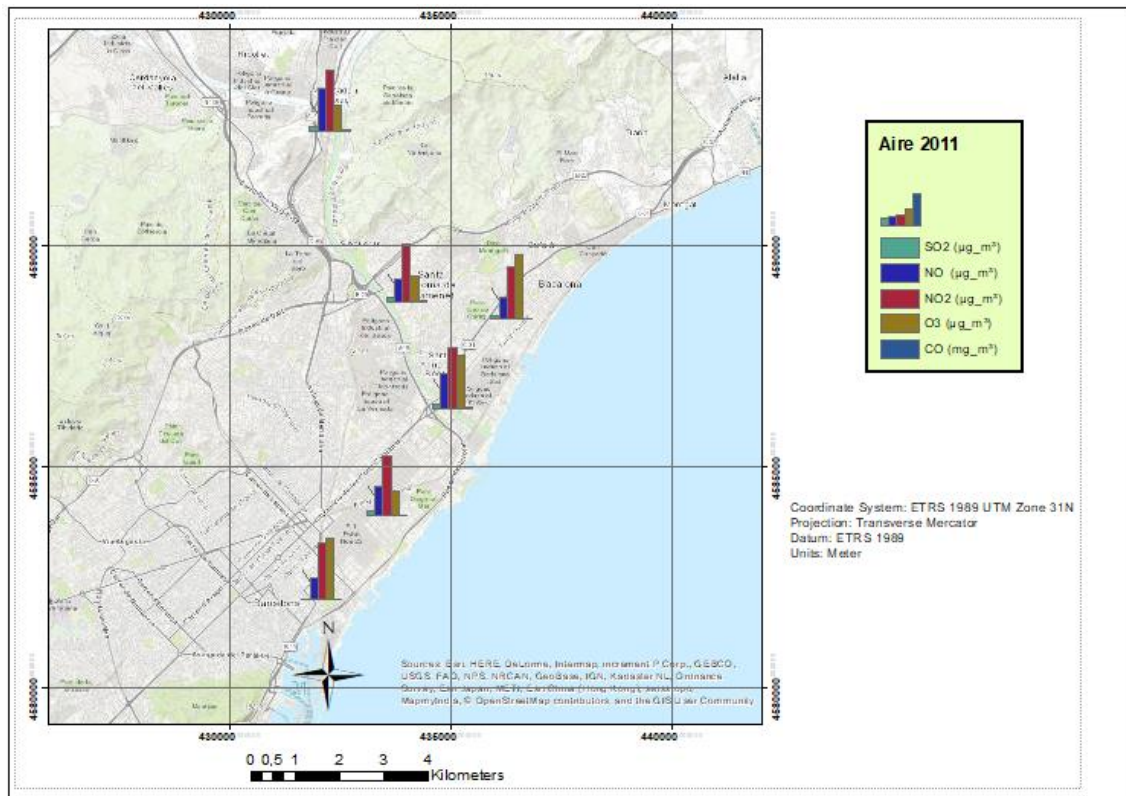


Figura 18. Contaminantes de las estaciones de aire 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos GenCat.

5.2.3. El estado tráfico

Tal y como se ve en la figura 19, en las estaciones B07 y B04 la concentración de clorofila-a se duplica en 3 años. En términos cualitativos, ha aumentado la producción de algas en esas estaciones, lo que genera menos transparencia y menos presencia de oxígeno, lo que disminuye a su vez la biodiversidad existente en la zona.

En cambio, en la estación B10 ha sido la única que ha disminuido su concentración de clorofila en estos 3 años. La concentración de clorofila en las demás estaciones ha permanecido constante.

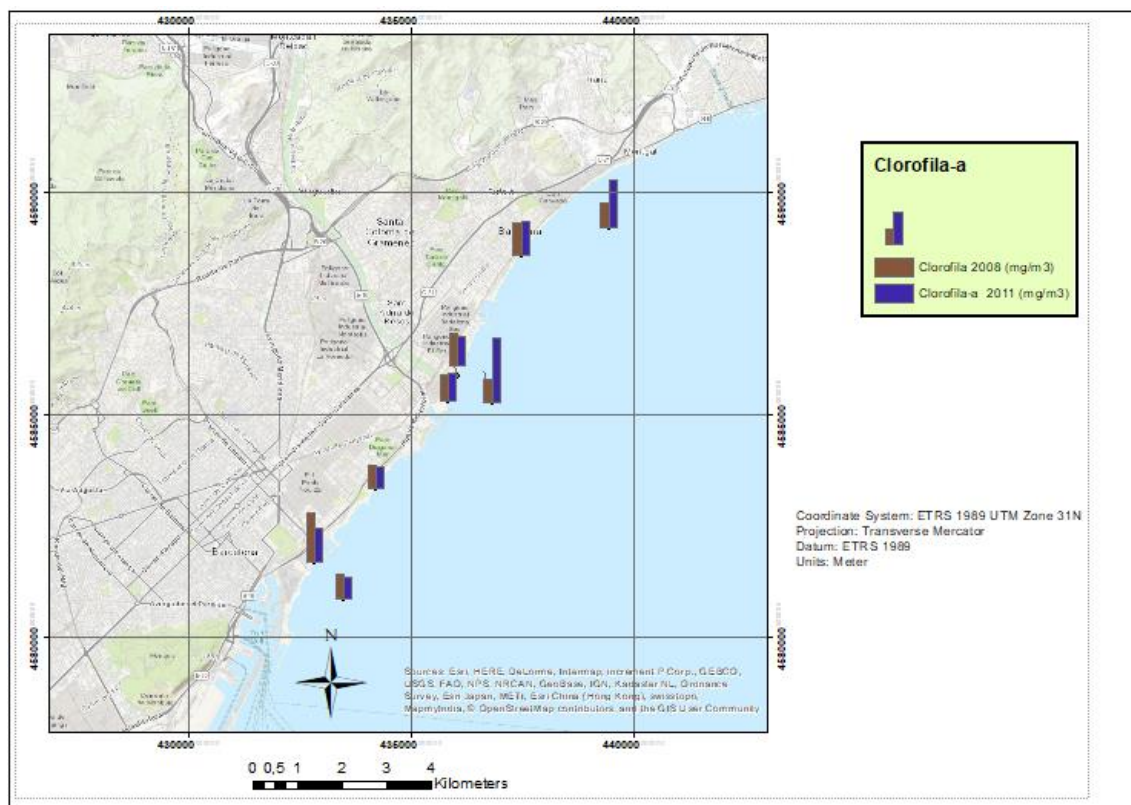


Figura 19. Clorofila-a de las estaciones del litoral 2008 y 2011. Fuente: Propia mediante el uso de ArcGIS y datos de la ACA.

En los apartados siguientes se muestran los resultados de los indicadores ambientales aplicando el método PSR en la cantidad de clorofila-a; en los contaminantes de agua subterránea, río y litoral; y en los contaminantes de aire.

5.3. Las presiones del sistema (2008-2011)

A continuación se presentan los resultados los indicadores hidrológicos, del aire y de clorofila-a en relación al estado de presión.

5.3.1. Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea

En la figura 20 se representan los resultados de los indicadores hidrológicos de los contaminantes amonio, fosfatos, nitratos y nitritos en las estaciones del litoral en el parámetro presión.

Recordando que el parámetro presión es el indicador de si ha mejorado la condición en términos de contaminante, se puede decir que en las estaciones B11, B06 y B09 son las estaciones donde más contaminantes han disminuido más del 20% desde el año 2008 al 2011. En cambio, en la estación B07 la concentración ha aumentado más del 10% para todos los contaminantes en los años de referencia. Las estaciones B05, B08, B04 y B10 tienen una ponderación diferente por

cada contaminante ya que en algunos casos, las concentraciones de los contaminantes en algunos han aumentado y en otros ha disminuido.

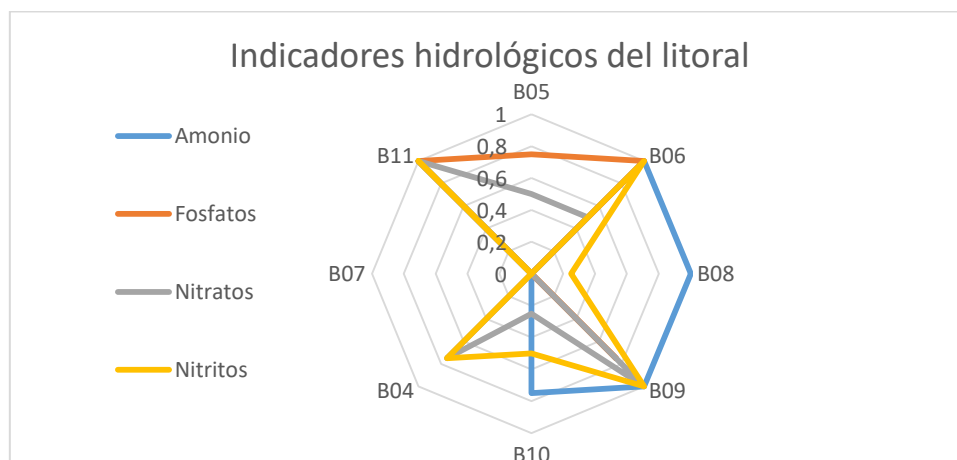


Figura 20. Resultados de la presión del sistema de los indicadores hidrológicos del litoral.

En la figura 21 se visualizan los resultados de los contaminantes analizados en las dos estaciones del río entre los años 2008 y 2011 dentro del parámetro presión.

En la estación B01, la condición ambiental ha mejorado dentro del contaminante nitrito ya que tiene ponderación 1, en otras palabras, ha disminuido su concentración más de un 20% respecto del 2008. En cambio, la condición ambiental ha empeorado dentro del contaminante nitrato ya que ha aumentado en más de un 10% respecto el 2008. Por otro lado, se puede observar que los contaminantes de amonio y sulfatos han disminuido ya que tienen una ponderación mayor a 0,5. Finalmente se puede observar que los contaminantes de sodio y cloruros han aumentado del año 2008 al año 2011.

En la estación B02 se puede ver que el amonio tiene la mayor ponderación ya que es el único contaminante que ha disminuido su concentración en más del 20% con respecto el año 2008 al 2011, en otras palabras, las condiciones ambientales han mejorado visto desde este contaminante. En cambio, los contaminantes nitritos y nitratos tienen ponderación cero ya que su concentración ha aumentado en más del 10%, por lo que las condiciones ambientales de esta estación si nos fijamos en estos dos contaminantes han empeorado. Los cloruros y el sodio han empeorado las condiciones ambientales de la estación pero los sulfatos y el amonio los han mejorado.

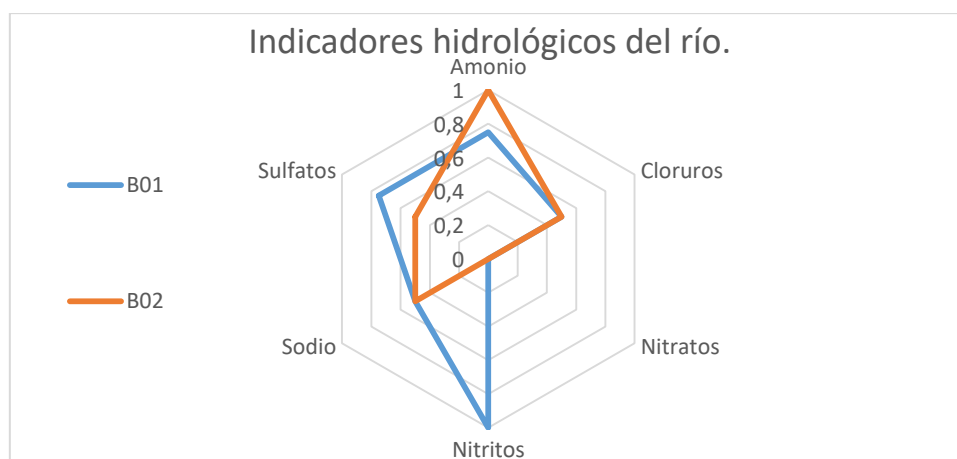


Figura 21. Resultados de la presión del sistema de los indicadores hidrológicos del río.

Con lo que respecta a los indicadores hidrológicos subterráneos representados en la figura 22, se puede ver que todos los componentes analizados en esta estación excepto el calcio han mejorado notablemente su condición ambiental ya que han disminuido en más de un 20% desde el año 2008 al 2011.

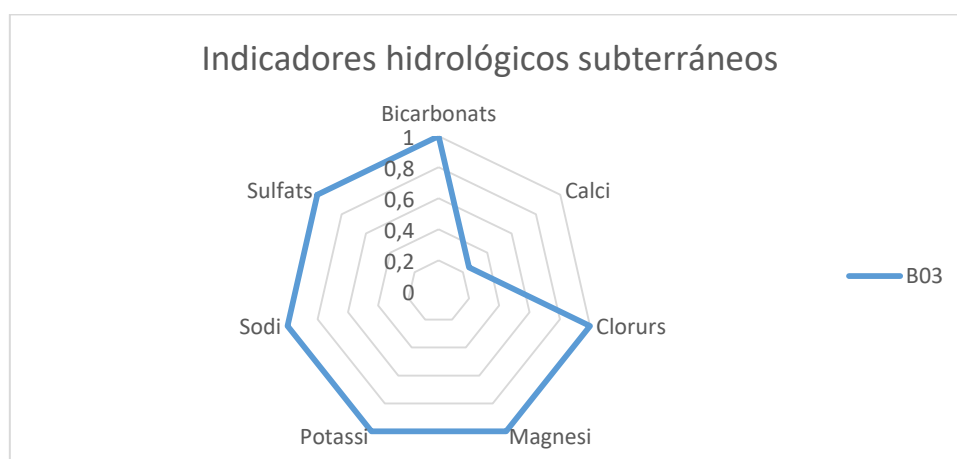


Figura 22. Resultados de la presión del sistema de los indicadores hidrológicos de aguas subterráneas.

5.3.2. Indicadores de contaminación del aire

En el indicador del aire de la figura 23 se puede ver que en el contaminante óxido de nitrógeno tiene mejor ofrece una mejor condición ambiental en más estaciones ya que en 3 estaciones obtiene la mayor ponderación. El contaminante dióxido de nitrógeno se podría decir que es el segundo mejor contaminante en términos del parámetro de presión ya que también ha obtenido una ponderación de 1 en la estación B14, pero valores menores de 1 en las demás estaciones. Con lo que respecta a los contaminantes dióxido de azufre y monóxido de carbono no se han podido determinar los indicadores en algunas estaciones por la falta de datos de alguno de los dos años, aunque se puede decir que dentro de los datos que se pudieron obtener en las estaciones indicadas en la figura

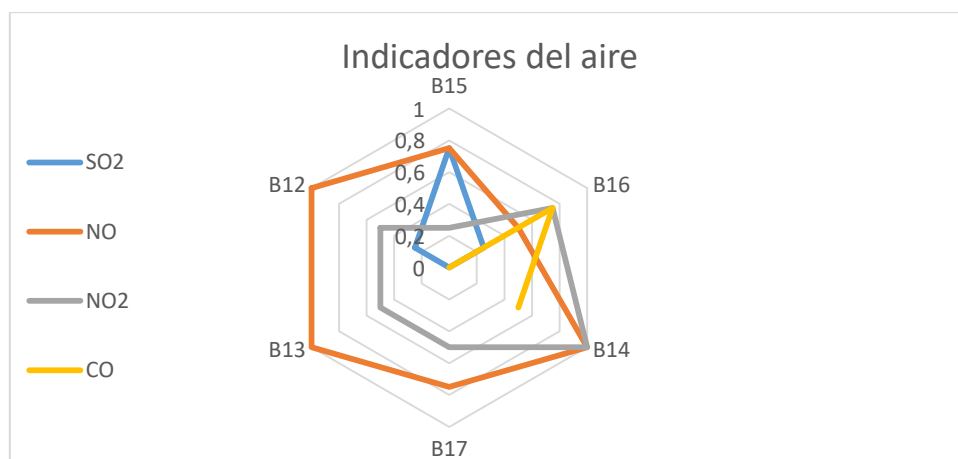


Figura 23. Resultados de la presión del sistema de los indicadores del aire.

5.3.3. Indicador clorofila-a

La figura 24 representa el indicador de clorofila-a en cada una de las estaciones del litoral en el parámetro presión. Por lo que se puede ver, en la estación B10 se mejoró bastante la condición ya que obtiene una ponderación de 1, en otras palabras, se redujo en más de un 20% de clorofila-a seguido de la estación B11 que tiene una ponderación de 0,75. Lo que representan una mejora ambiental según el parámetro de presión. En otras palabras, la cantidad de clorofila-a ha disminuido del año 2008 al año 2011.

Por otro lado, se puede ver que las estaciones B05, B07, B04, B06, B08 y B09 representan un deterioro ambiental debido a sus valores menores de 0,5 en el parámetro de presión. En otras palabras, la cantidad de clorofila-a ha aumentado desde el año 2008 al año 2011.

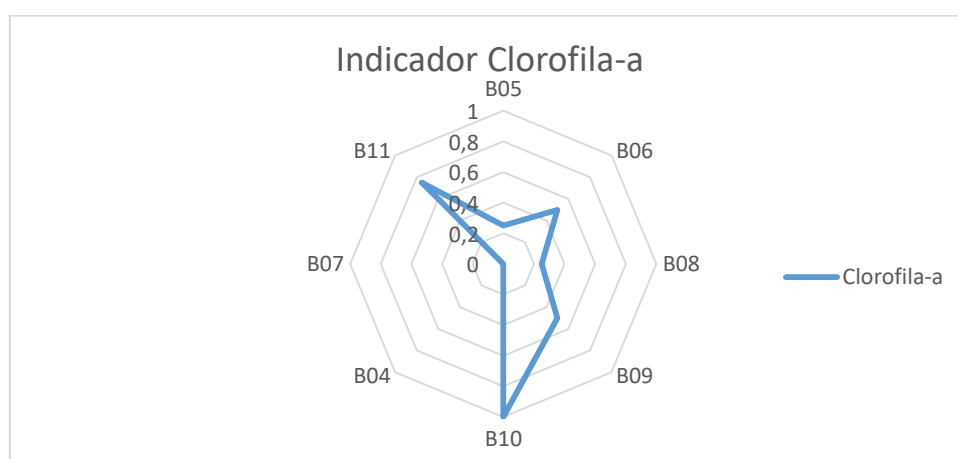


Figura 24. Resultados de la presión del sistema del indicador clorofila-a.

5.4. El estado del sistema (2011)

A continuación se presentan los resultados los indicadores hidrológicos, del aire y de clorofila-a en relación a su estado.

5.4.1. Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea

Los resultados de los parámetros de los indicadores hidrológicos del litoral se muestran en la figura 25 en la que se observa la relación entre los valores de los indicadores y sus estaciones analizadas.

Se puede ver que la estación B11 y B04 tienen buena calidad de agua del litoral en base a estos contaminantes ya que sus valores de los indicadores son muy cercanos a 1. En cambio, la estación B07 es la estación que peor calidad de agua litoral tiene ya que tiene los contaminantes con valores más próximos a 0.

Por lo general, en todas las estaciones se aprecia una buena calidad si se tiene en cuenta los contaminantes de fosfatos y nitratos. En cambio, si se considera la calidad de agua de las estaciones en base a los contaminantes de amonio y nitrito, se puede ver que son los contaminantes que más bajo tiene el valor en términos de indicador ya que sus valores están próximos a los límites recomendados en algunas estaciones.

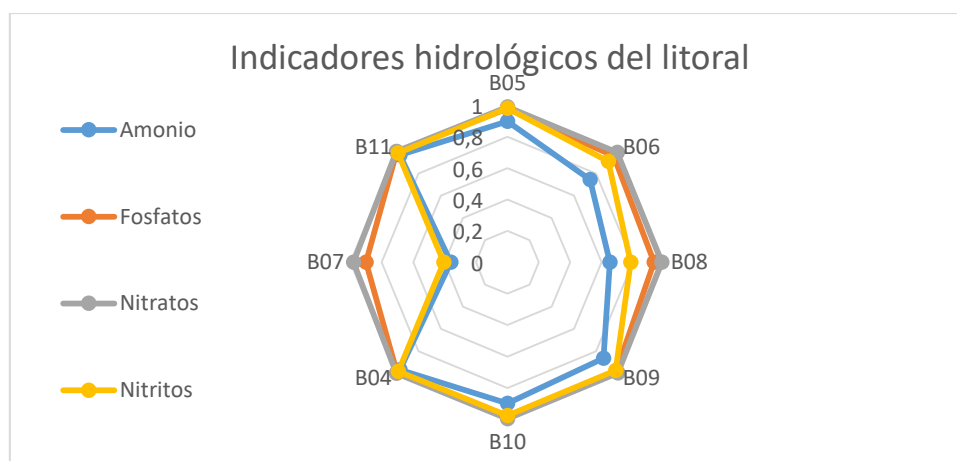


Figura 25. Resultados del estado del sistema de los indicadores hidrológicos del litoral.

A diferencia de los indicadores hidrológicos del litoral vistos en la figura 25, los indicadores hidrológicos del río muestran una clara baja calidad si se observan las altas concentraciones de amonio, cloruros, sulfatos, nitratos, nitritos y sodio en ambas estaciones tal y como se refleja en la figura 26. El amonio y los nitritos tienen la ponderación más baja de los indicadores en las dos estaciones situadas en el río Besòs.

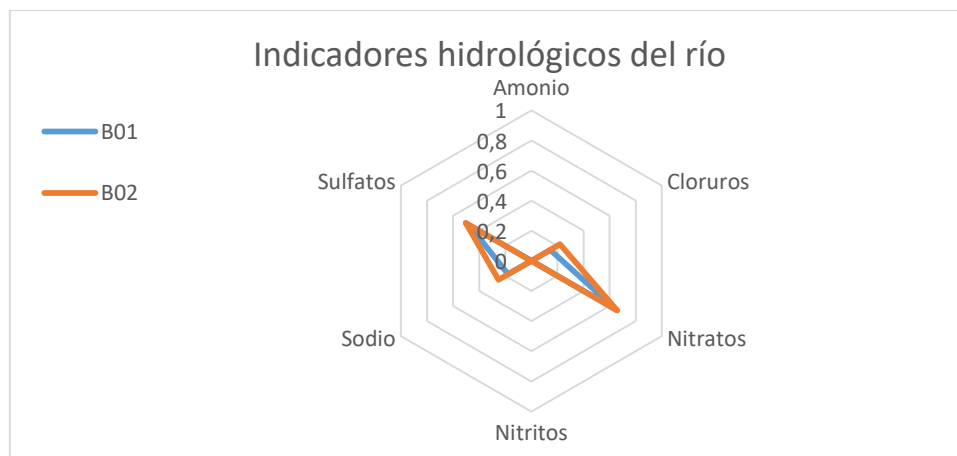


Figura 26. Resultados del estado del sistema de los indicadores hidrológicos del río.

En lo que los indicadores hidrológicos subterráneos se refieren (figura 27), se puede ver que los indicadores de los contaminantes de bicarbonato, potasio, magnesio y magnesio (sólidos disueltos totales) tienen valores próximos a 1 ya que sus valores de concentración están próximos o por debajo de 300 mg/L. En cambio, los indicadores de los contaminantes de sulfatos, sodio y cloruros tienen valores muy cercanos o han sobrepasado los límites establecidos en esta tesis, por lo que tienen una ponderación muy próxima o igual a cero.

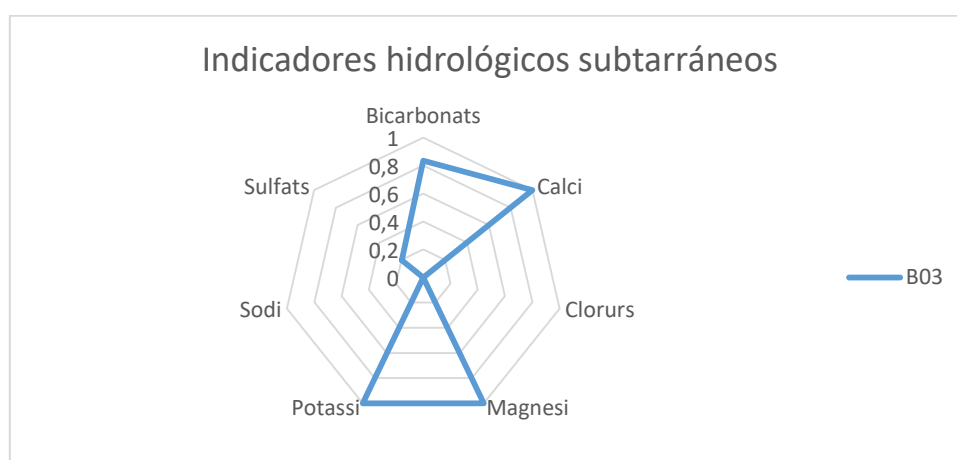


Figura 27. Resultados del estado del sistema de los indicadores hidrológicos de aguas subterráneas.

5.4.2. Indicadores de contaminación del aire

La figura 28 representa el resultado de la aplicación de los indicadores del aire. Se puede ver que en la estación B17 no se tomaron valores del año 2011 de los contaminantes de monóxido de carbono y de dióxido de azufre.

En las estaciones de donde se tomaron datos, se puede ver que la ponderación fue de aproximadamente 1 ya que los valores que se tomaron en cada una de las estaciones fueron muy bajos con respecto a los límites establecidos en esta tesis. En el caso del monóxido de

nitrógeno se puede ver que la ponderación de las estaciones B13, B17, B14 y B16 varía entre 0,4 y 0,6. En cambio, En la estación B12 tiene una ponderación de entre 0,2 y 0. El contaminante de dióxido de nitrógeno tiene un valor de aproximadamente 0 en todas las estaciones.

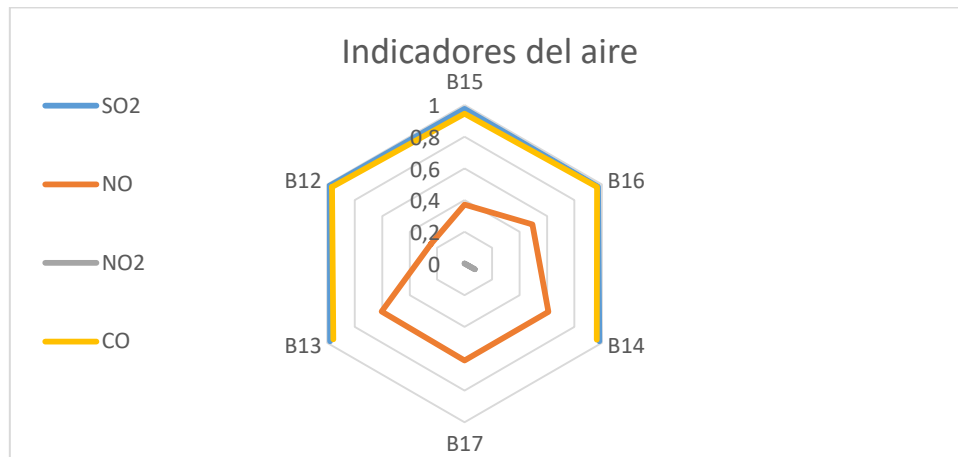


Figura 28. Resultados del estado del sistema de los indicadores del aire.

5.4.3. Indicador clorofila-a

En la figura 29 se representa los resultados del indicador clorofila-a de las estaciones del litoral. Se puede ver claramente que aplicando los criterios de niveles de estados tróficos según su concentración de clorofila-a de la OECD, los resultados de indicador tienen como valor 1 en todas las estaciones, en otras palabras, tienen un estado oligotrófico.

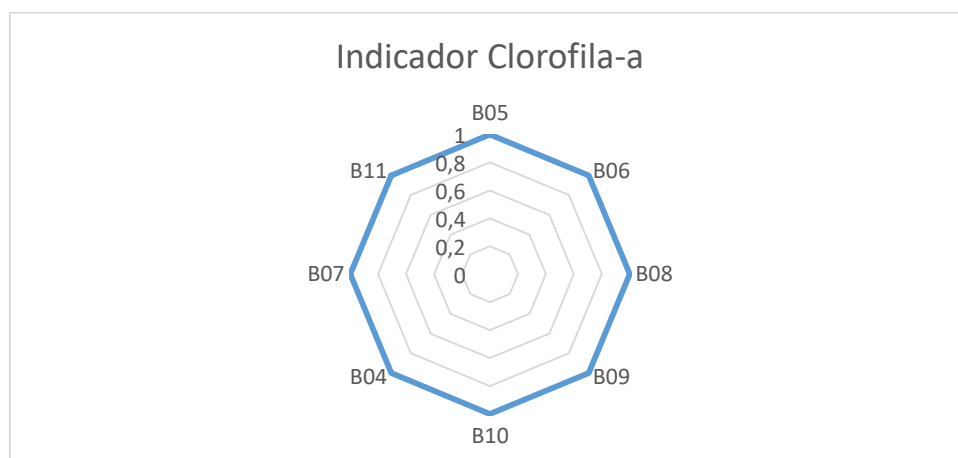


Figura 29. Resultados del estado del sistema del indicador clorofila-a.

5.5. Las respuestas de sistema (2011)

Recordando que el indicador R1 representa la existencia de monitorización en la estación y R2 representa la existencia de una intervención y objetivo alcanzado, se aplicaron dichos

indicadores en el agua de litoral, río y subterráneo; en el aire; y en la clorofila-a del litoral de la zona de estudio.

En general se puede ver existe monitorización en cada una de las estaciones seleccionadas, por lo que R1 será mayoritariamente 1 como valor ponderado. Con lo que respecta al indicador R2, la intervención que se tuvo en cuenta fue el proyecto Parc Fluvial del Besòs, por lo que no todas las estaciones estuvieron involucradas en esta intervención

5.5.1. Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea

La figura 30 representa los resultados del parámetro respuesta del indicador hidrológico litoral en el que se puede ver que el indicador R1 tiene muy buena ponderación en todas las estaciones ya que se aplicó un programa de monitoreo.

En cambio, el indicador R2 tiene muy buena ponderación en las estaciones B06, B07 y B08 ya que existió la intervención del Parc Fluvial y están cumpliendo su objetivo, disminuir el nivel de contaminación del litoral.

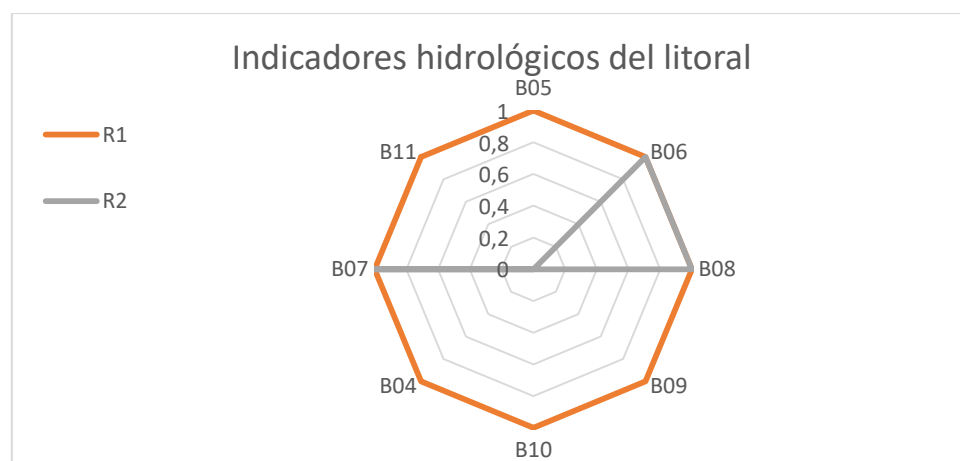


Figura 30. Resultados de la respuesta del sistema de los indicadores hidrológicos del litoral.

En la tabla 10 se observa que las estaciones que analizan el agua superficial del río y el agua subterránea tienen la ponderación más alta en el indicador R1 ya que existe un programa de monitoreo y de ha aplicado en todos y cada uno de los contaminantes.

En cambio, en el indicador R2 tiene una ponderación de cero en la estación B01 ya que no se realizó ninguna intervención. En cambio, en las estaciones B02 y B03 tienen la ponderación más alta ya que se realizó al menos una intervención (Proyecto Paseo Fluvial) y los objetivos se están cumpliendo (descontaminación de la zona).

Tabla 10. Resultados indicadores hidrológicos del río (B01, B02) y subterráneo (B03) del parámetro de respuesta.

Estación	R1	R2
B01	1	0
B02	1	1
B03	1	1

5.5.2. Indicadores de contaminación del aire

En la figura 31 se puede ver que existen programas de monitoreo y se aplican en todos sus contaminantes en todas las estaciones.

Por otro lado, el indicador R2 muestra que únicamente en las estaciones B13 y B15 se hicieron intervenciones (Proyecto Paseo Fluvial) y se cumplieron los objetivos. En cambio, en las demás estaciones no se realizó ninguna intervención.

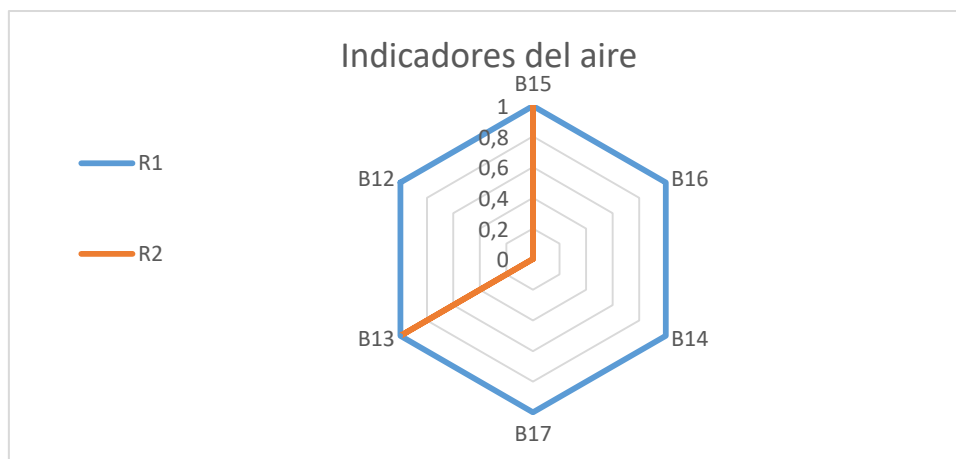


Figura 31. Resultados de la respuesta del sistema de los indicadores del aire.

5.5.3. Indicador clorofila-a

En la figura 32 se muestran los resultados del parámetro respuesta en clorofila-a. El indicador R1 refleja que en todas las estaciones hay un programa de monitoreo y se monitorea en clorofila-a. En cambio, el indicador R2 indica que las tres únicas estaciones que tienen ponderación 1 son B06, B07 y B08 ya que existió una intervención (Proyecto Paseo Fluvial) en la zona donde están involucradas estas estaciones y se cumplieron los objetivos de esas intervenciones.

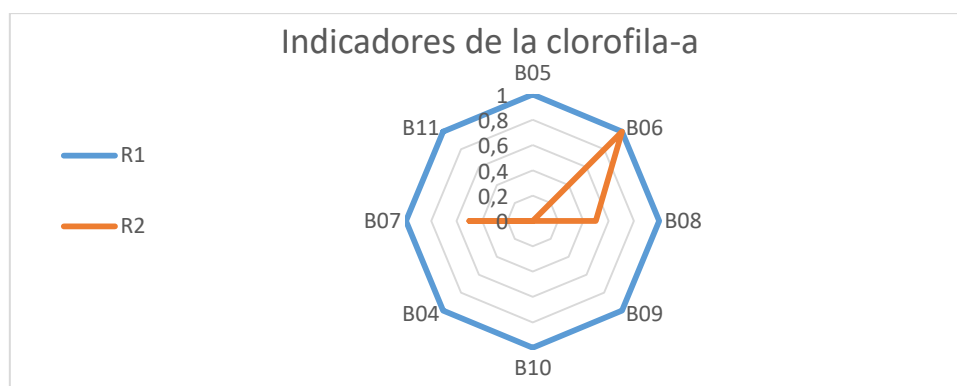


Figura 32. Resultados de la respuesta del sistema del indicador clorofila-a.

5.6. Indicadores agregados de calidad ambiental

A continuación se presentan en la tabla 12 los resultados de los índices agregados de calidad ambiental.

Tabla 11. Resultados de la aplicación de indicadores ambientales en los índices en cada una de las estaciones.

		P	S	R	IW Geométrica	IW Aritmética
LITORAL	B05	0,313	0,963	0,500	0,532	0,592
	B06	0,875	0,901	1,000	0,924	0,925
	B08	0,313	0,840	1,000	0,640	0,717
	B09	0,938	0,955	0,500	0,765	0,797
	B10	0,375	0,963	0,500	0,565	0,613
	B04	0,375	0,986	0,500	0,570	0,620
	B07	0,000	0,662	1,000	0,000	0,554
	B11	1,000	0,987	0,500	0,790	0,829
RIO	B01	0,583	0,241	0,500	0,413	0,442
	B02	0,417	0,272	1,000	0,484	0,563
SUBTERRÁNEO	B03	0,857	0,576	1,000	0,790	0,811
AIRE	B15	0,350	0,595	1,000	0,593	0,648
	B16	0,650	0,656	0,500	0,597	0,602
	B14	0,500	0,649	0,500	0,545	0,550
	B17	0,417	0,414	0,500	0,442	0,444
	B13	0,300	0,677	1,000	0,588	0,659
	B12	0,688	0,609	0,500	0,594	0,599
CLOROFILA-A	B05	0,250	1,000	0,500	0,500	0,583
	B06	0,500	1,000	1,000	0,794	0,833
	B08	0,250	1,000	0,750	0,572	0,667
	B09	0,500	1,000	0,500	0,630	0,667
	B10	1,000	1,000	0,500	0,794	0,833
	B04	0,000	1,000	0,500	0,000	0,500
	B07	0,000	1,000	0,750	0,000	0,583
	B11	0,750	1,000	0,500	0,721	0,750

Como se ha detallado en la metodología, para obtener un valor representativo por cada índice correspondiente, se han aplicado las medias aritméticas de los contaminantes en cada una de las estaciones tal y como se puede ver en la tabla 11. Además, también se ha aplicado las medias aritméticas [62] y geométricas [78] en presión, estado y respuesta por cada índice para obtener un resultado que recoja la información del estado en el año en que se mide, su variación en el periodo de años escogido (en este caso del 2008 al 2011) y la respuesta que se ha aplicado para el problema.

En esta tesis se ha decidido utilizar la media aritmética aplicada por Henrique M.L. Chaves y Suzana Alipaz [62] para la agrupación PSR ya que una subestimación en uno de los indicadores puede ser compensada por la sobreestimación en otro.

5.6.1. Indicadores de contaminación hidrológica del río, del litoral y de agua subterránea

En las estaciones del litoral se pueden ver que los valores de la presión del sistema varían entre el 0 y el 1 siendo la estación B11 la estación con mejor ponderación y la estación B07 con peor ponderación ya que los contaminantes no han disminuido tanto sus concentración respecto a las demás estaciones o incluso han aumentado desde el año 2008 al año 2011. La estación B11 es la estación que mayor ponderación tiene ya que los valores de sus contaminantes han disminuido más del 20%.

En el estado del sistema, los valores son superiores a 0,8 en el parámetro estado excepto en la estación B07 ya que tiene una peor calidad ambiental según sus contaminantes analizados. La estación que mayor calidad ambiental en términos de agua del litoral según sus contaminantes es la B11 obteniendo un valor de 0,987.

En la respuesta del sistema los valores varían del 0,5 al 1 siendo B06, B07 y B08 las estaciones que mayor ponderación tienen ya que se aplica un programa de monitorización en todos sus contaminantes y se han realizado intervenciones cuyos objetivos se han cumplido. En cambio, en las demás estaciones tienen una ponderación de 0,5 ya que no se realizaron ninguna intervención.

En el índice global calculado de forma geométrica y aritmética, la estación B06 tiene la mayor ponderación debido a los valores altos que tiene en sus tres parámetros, en cambio la estación B07 tiene la peor ponderación ya que su parámetro de presión es mínimo y su parámetro estado es el más bajo de ente las estaciones.

Por otro lado las presiones del sistema de las estaciones del índice del agua del río son valores próximos a 0,5, por lo que no ha mejorado el estado ambiental de la zona en términos de contaminantes hidrológicos. En el estado del sistema se puede ver que en el año 2011 ha tenido un estado ambiental pobre con unas ponderaciones que no superan el 0,3. Finalmente se puede ver en la respuesta del sistema que tienen valores 0,5 y 1 lo que significa que en la primera estación no ha habido ninguna intervención y en la segunda estación sí que ha habido intervención y se ha cumplido su objetivo. Finalmente, se puede comentar que sus índices globales calculados de forma geométrica y aritmética tienen unos valores próximos a 0,5 siendo la zona con las ponderaciones más bajas de nuestro estudio.

En el índice de aguas subterráneas se puede ver que en la presión del sistema tiene un valor alto ya que su estado ambiental en términos de contaminantes hidrológicos ha mejorado a pesar de tener un estado ambiental regular en el año 2011 tal y como se puede ver en su estado del sistema. En la respuesta del sistema de este índice indica que se hace monitorización además de haberse realizado una intervención cuyos objetivos se cumplieron. Finalmente se puede ver que en sus índices globales calculados de forma aritmética y geométrica tienen valores de 0,79 y 0,81 respectivamente siendo unos valores de índices relativamente altos frente a los demás índices.

Todos los valores de medias aritméticas comentados se pueden visualizar de forma geográfica mediante la herramienta ArcGis en la figura 33.

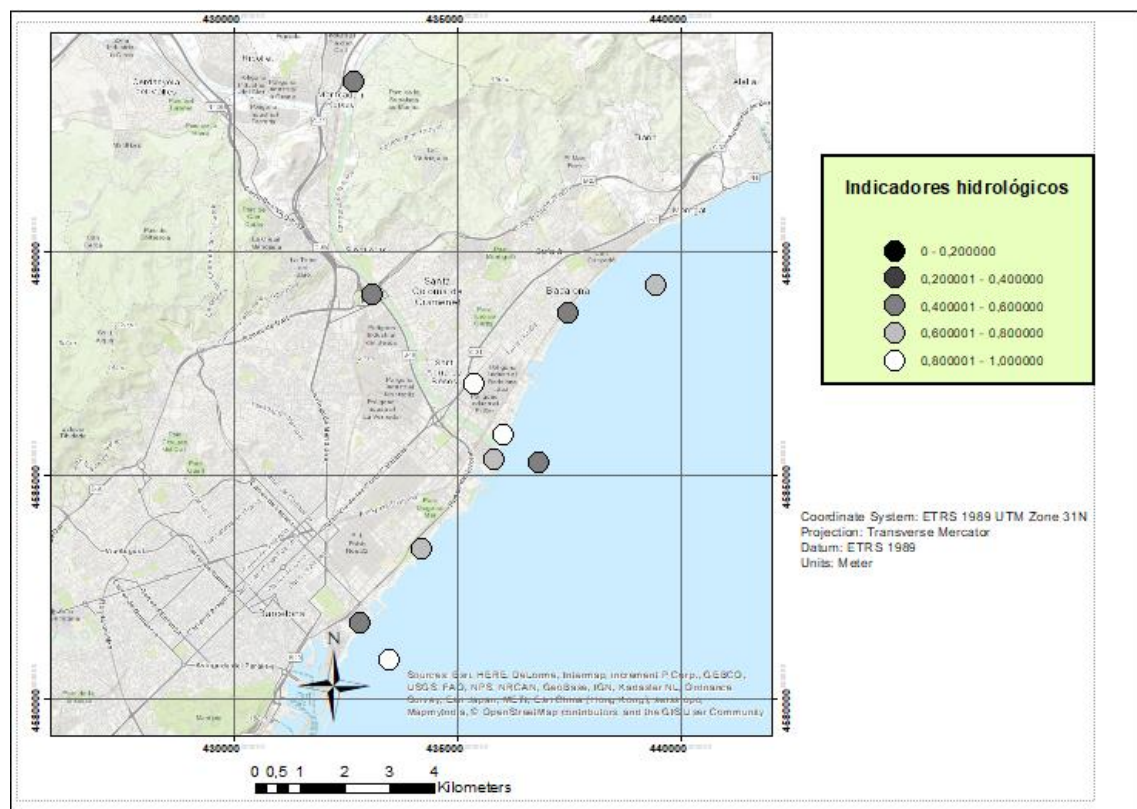


Figura 33. Indicadores hidrológicos de río, litoral y subterráneo aplicando media aritmética en PSR.

5.6.2. Indicadores de contaminación del aire

En el parámetro de presión del indicador del aire se puede ver que los valores de las estaciones se sitúan entre 0,3 y 0,7 siendo B12 la estación con mayor ponderación ya que su estado ambiental según los contaminantes de aire analizados ha mejorado en general. En cambio, B13 es la estación con la menor ponderación ya que su estado ambiental en términos de contaminantes del aire ha mejorado poco o incluso ha empeorado desde el año 2008 hasta el año 2011.

En el parámetro de estado, los valores de las estaciones se sitúan entre 0,4 y 0,7. La estación con la ponderación más alta es la B13 indicando así la estación con el mejor estado ambiental en aire. En cambio, la estación con la ponderación más baja es la B17 ya que tiene el peor estado ambiental de aire.

En el parámetro de respuesta, los valores varían del 0,25 al 1 siendo B13 y B15 las estaciones con mayor ponderación ya que se aplican programas de monitorización en cada uno de los contaminantes y existen intervenciones cuyos objetivos se cumplieron. En cambio, B12 y B17 son las estaciones con menor ponderación ya que no se realizó ninguna intervención y el programa de monitorización no se aplican a todos los contaminantes.

En el índice global calculado de forma geométrica y aritmética, las estaciones B13, B15 y B16 tienen la mayor ponderación debido a los valores altos que tiene en sus tres parámetros, en cambio la estación B17 tiene la peor ponderación ya que su parámetro de presión es mínimo y su parámetro estado es el más bajo de ente las estaciones.

Todos los valores de medias aritméticas comentados se pueden visualizar de forma geográfica mediante la herramienta ArcGIS en la figura 34.

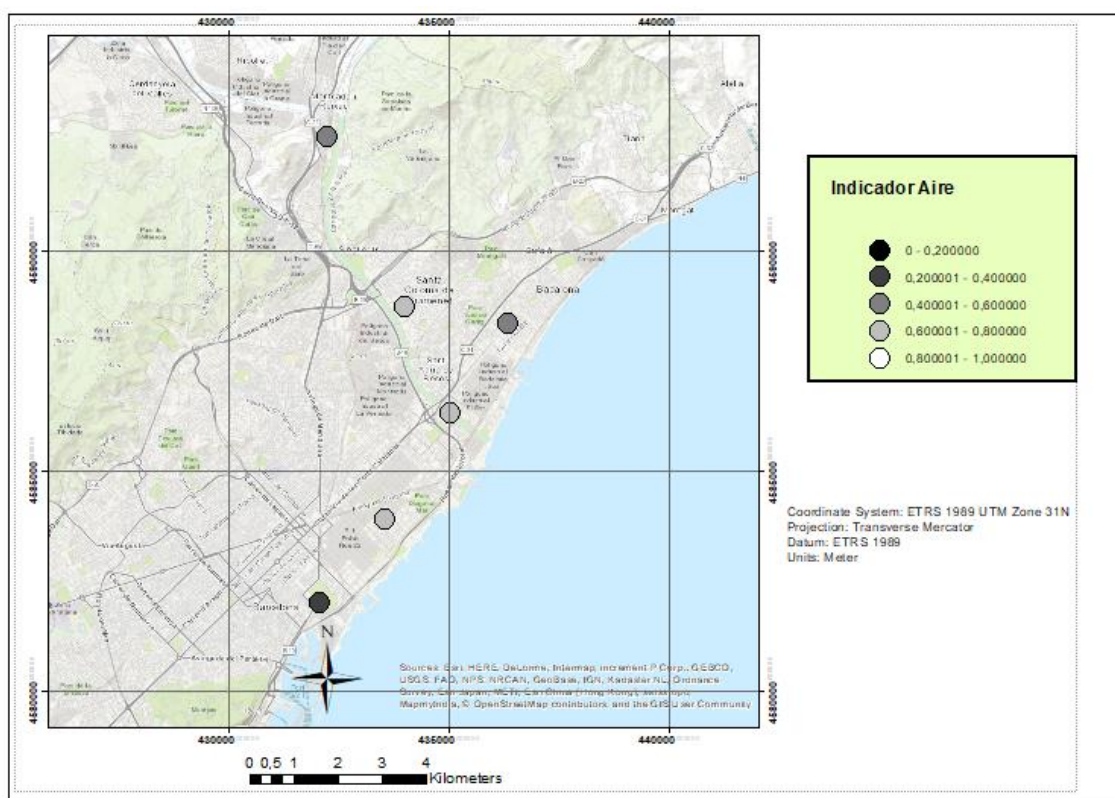


Figura 34. Indicadores del aire aplicando media aritmética en PSR.

5.6.3. Indicador clorofila-a

Los valores de las estaciones en el parámetro presión varían entre el 0 y el 1 siendo la estación B10 más ponderada debido a que más concentración de clorofila-a ha disminuido. En cambio, B04 y B07 tienen las ponderaciones mínimas ya que ha aumentado la concentración de clorofila-a. En el parámetro estado se puede ver que en todas las estaciones hay ponderación 1 ya que hay un estado oligotrófico. Con lo que respecta al parámetro de respuesta, las ponderaciones varían entre el 0,5 y el 1 ya que en todas se realiza monitorización pero no en todas las estaciones se ha realizado alguna intervención y que sus objetivos se disminuir la concentración de clorofila-a se hayan cumplido.

Todos los valores de medias aritméticas comentados se pueden visualizar de forma geográfica mediante la herramienta ArcGis en la figura 35.

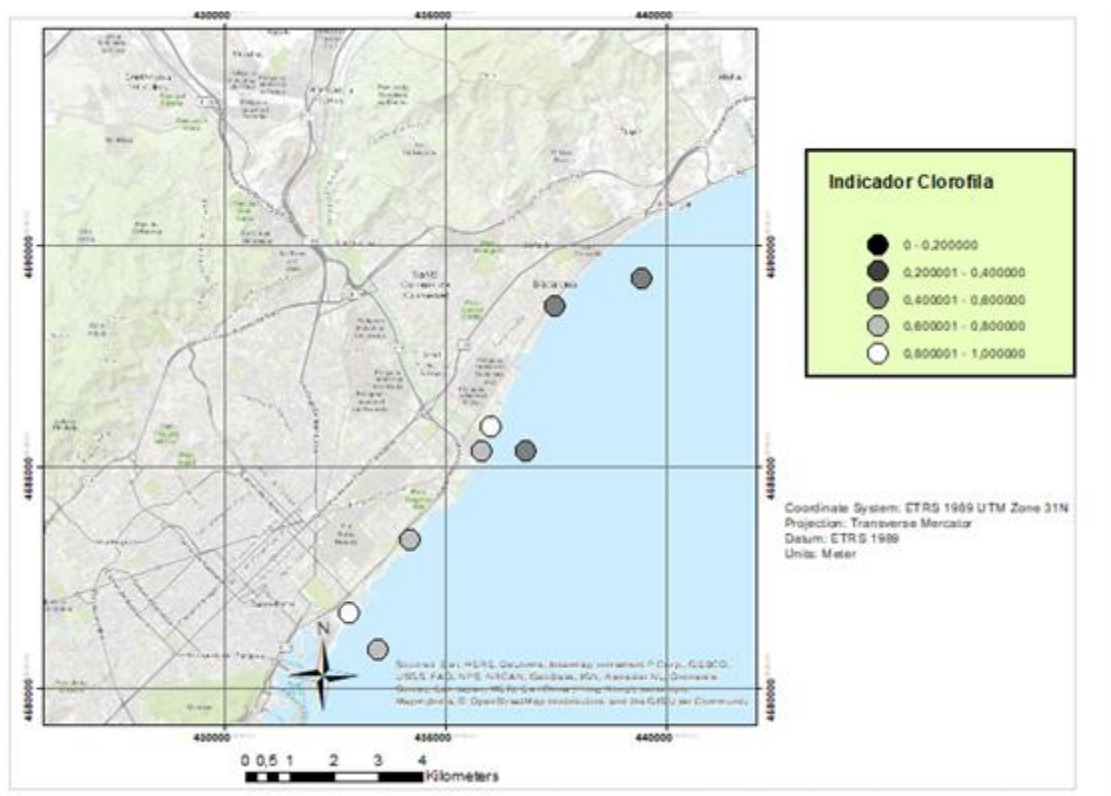


Figura 35. Indicador de la clorofila-a aplicando media aritmética en PSR.

En los siguientes apartados se ha aplicado la metodología para los años 2014 y 2017. En los indicadores ambientales propuestos para el estado ambiental del aire faltan datos de algunas de las estaciones analizadas a lo largo de este proyecto, por lo que sólo los contaminantes óxidos nitrosos son los únicos analizados en todas las estaciones seleccionadas. El dióxido de azufre es únicamente analizado por las estaciones B12, B14 y B15. El indicador de ozono sólo tiene presencia en las estaciones B12, B14, B15 y B17. El monóxido de carbono tiene presencia únicamente en la estación B12.

5.7. Evolución temporal: comparativa entre el período 2008-2011 y el período 2014-2017

En esta sección se aplica la misma metodología de análisis para el periodo comprendido entre los años 2014 y 2017. Se calculan las presiones del sistema durante este periodo y los estados del sistema de los años 2014 y 2017, con el fin de discutir la evolución de los indicadores ambientales en relación a las respuestas planteadas en el período anterior (2008-2011). Se han podido aplicar únicamente a la contaminación del agua del río y a la del aire, debido a la falta de información proporcionada por la ACA en relación a los otros indicadores.

Se ha dividido el análisis en dos apartados. En el primero, se analizarán los resultados en base a los indicadores ambientales. En el segundo, en base a los índices ambientales. En el anexo V se muestran todos los resultados.

5.7.1. Indicadores de contaminación hidrológica del río y del aire

Los indicadores hidrológicos del río no han mostrado correlación entre las respuestas del sistema con sus estados y presiones del sistema. De modo ilustrativo, se muestran sólo las presiones y los estados de dos indicadores ambientales hidrológicos del río.

En la figura 36 se puede ver que cuando la respuesta del sistema de los nitratos es mayor, el estado del sistema de los nitratos empeora. En el caso de la presión del sistema del amonio se puede ver un efecto inverso de la respuesta del sistema sobre la presión del sistema ya que cuando la respuesta es mayor, la presión del sistema es peor.

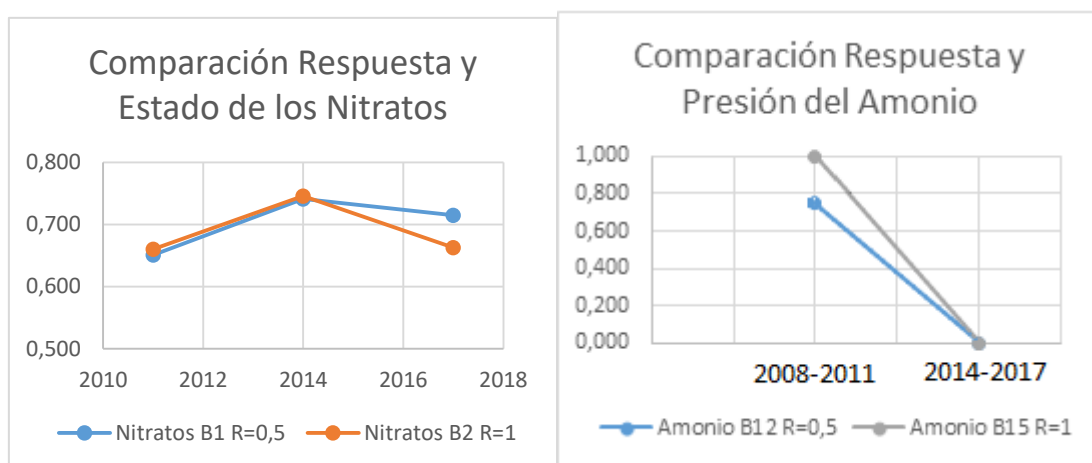


Figura 36. Imagen izquierda: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con los estados del indicador Nitrato. Imagen derecha: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con las presiones del indicador amonio.

La figura 37 muestra que la respuesta del sistema tiene correlación con el indicador óxido de nitrógeno (NO) ya que cuando la respuesta del sistema es mayor, el estado y presión del sistema es mejor. En cambio, no tiene correlación con el indicador dióxido de nitrógeno (NO₂) ya la

tendencia en el estado del sistema es mayor cuando la respuesta es menor y la tendencia en la presión del sistema es la misma con diferentes respuestas del sistema.



Figura 37. Imagen superior: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con los estados de los indicadores NO y NO2. Imagen inferior: Comparación de los resultados de la respuesta del sistema con las presiones de los indicadores NO y NO2.

Viendo los resultados de este apartado se puede decir que las respuestas de los sistemas tienen correlación sobre los estados y presiones del sistema con algunos de los indicadores ambientales propuestos.

5.7.2. Índices ambientales

Tabla 12. Resultados de la aplicación de indicadores ambientales en los índices en cada una de las estaciones.

	Estación	P (2008-2011)	S 2011	R	P (2014-2017)	S 2014	S 2017
RIO	B01	0,583	0,241	0,500	0,341	0,498	0,520
	B02	0,417	0,272	1,000	0,318	0,525	0,525
	B12	0,688	0,595	0,500	0,350	0,595	0,616
AIRE	B13	0,300	0,656	1,000	0,650	0,366	0,380
	B14	0,500	0,649	0,500	0,500	0,529	0,567
	B15	0,350	0,414	1,000	0,417	0,354	0,393
	B16	0,650	0,677	0,500	0,300	0,314	0,233
	B17	0,417	0,609	0,500	0,750	0,464	0,448

La tabla 12 muestra una comparativa de los resultados aplicando los indicadores ambientales en los periodos de 2008-2011 y 2014-2017.

Se puede ver que aplicando la misma respuesta para los tres estados del sistema, el estado del sistema ha mejorado a lo largo de los años 2011 2014 y 2017 en las estaciones que pertenecen al río y en la estación B12 que monitoriza el aire. En cambio, en las demás estaciones que monitorizan los valores de los contaminantes del aire se puede ver que han disminuido las ponderaciones del estado del sistema.

Con respecto las presiones del sistema en los dos periodos de tiempo, se puede ver que en las estaciones del río hay una menor presión en el segundo periodo de tiempo. Esto indica que ya no se aprecia una gran mejora como en el primer periodo o incluso que está empeorando la zona aplicando la misma respuesta del sistema.

Posiblemente, el aumento de los niveles de contaminantes aéreos se deba a que la contaminación aérea mayoritariamente tiene como procedencia la combustión de los vehículos que atraviesan la zona de estudio.

Se puede ver claramente que no existe una correlación entre la respuesta del sistema con las presiones y los estados del sistema ya que una mejor respuesta del sistema no implica una mejora en las presiones ni en los estados.

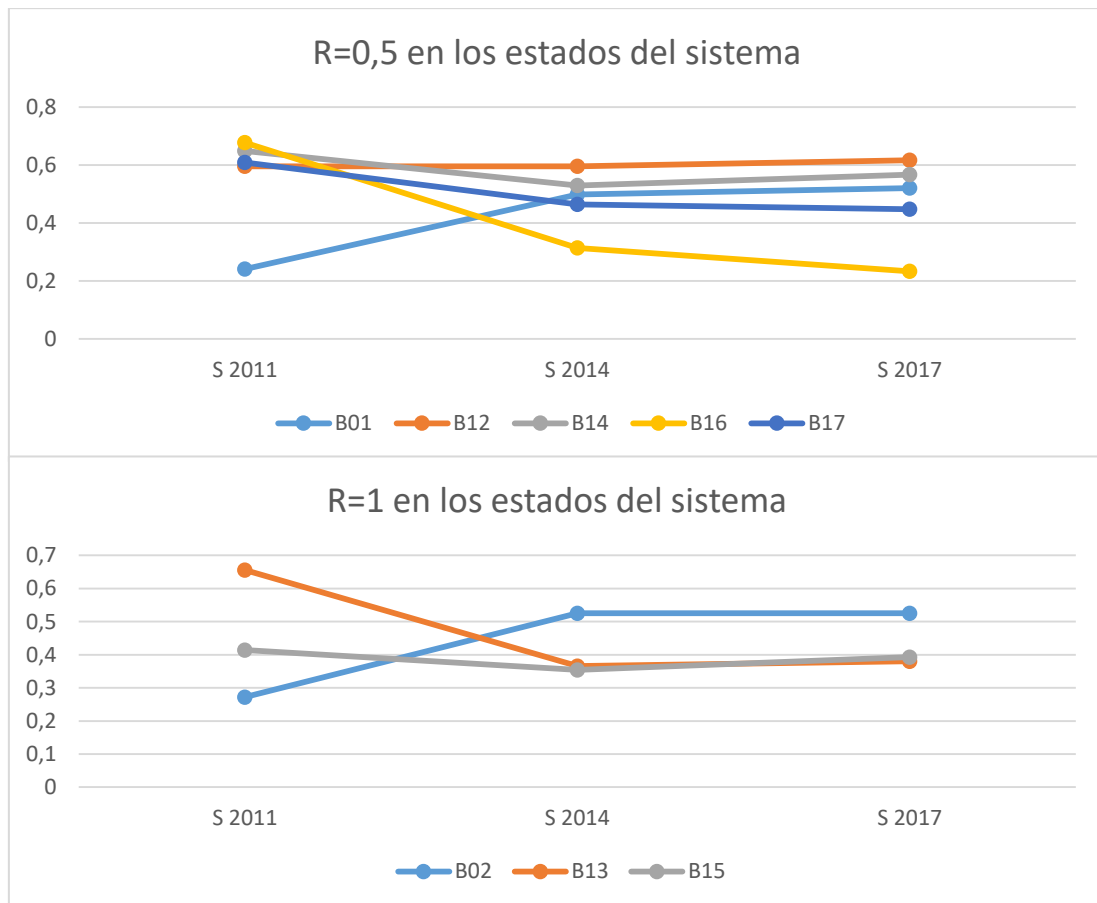


Figura 38. Resultados de los índices de las respuestas del sistema con los estados del sistema. Imagen superior: estaciones con $R=0,5$. Imagen inferior: estaciones con $R=1$.

En la imagen superior de la figura 38 se puede ver que con una respuesta 0,5, B16 es la estación que tiene una peor evolución temporal en su estado. En cambio, B01 es la estación con mejor evolución temporal en su estado. En la imagen inferior de la misma figura se puede ver que con una respuesta de 1, B13 es la estación con peor evolución temporal en su estado. En cambio, B02 es la estación con mejor evolución temporal en su estado.

Se puede ver en general que los valores de estado del sistema en las estaciones de río son las que mejoran a diferencia de las estaciones situadas en el aire.

En la imagen superior de la figura 39 se puede ver que con una respuesta 0,5, B12 y B16 son las estaciones que tienen una peor tendencia temporal en su presión del sistema. En cambio, B17 es la estación que tiene mejor tendencia temporal en su presión. Con lo que respecta en la imagen inferior de la misma figura, la mejor tendencia temporal de la presión del sistema es la estación B13. La estación B02 tiene la peor tendencia temporal de la presión del sistema.

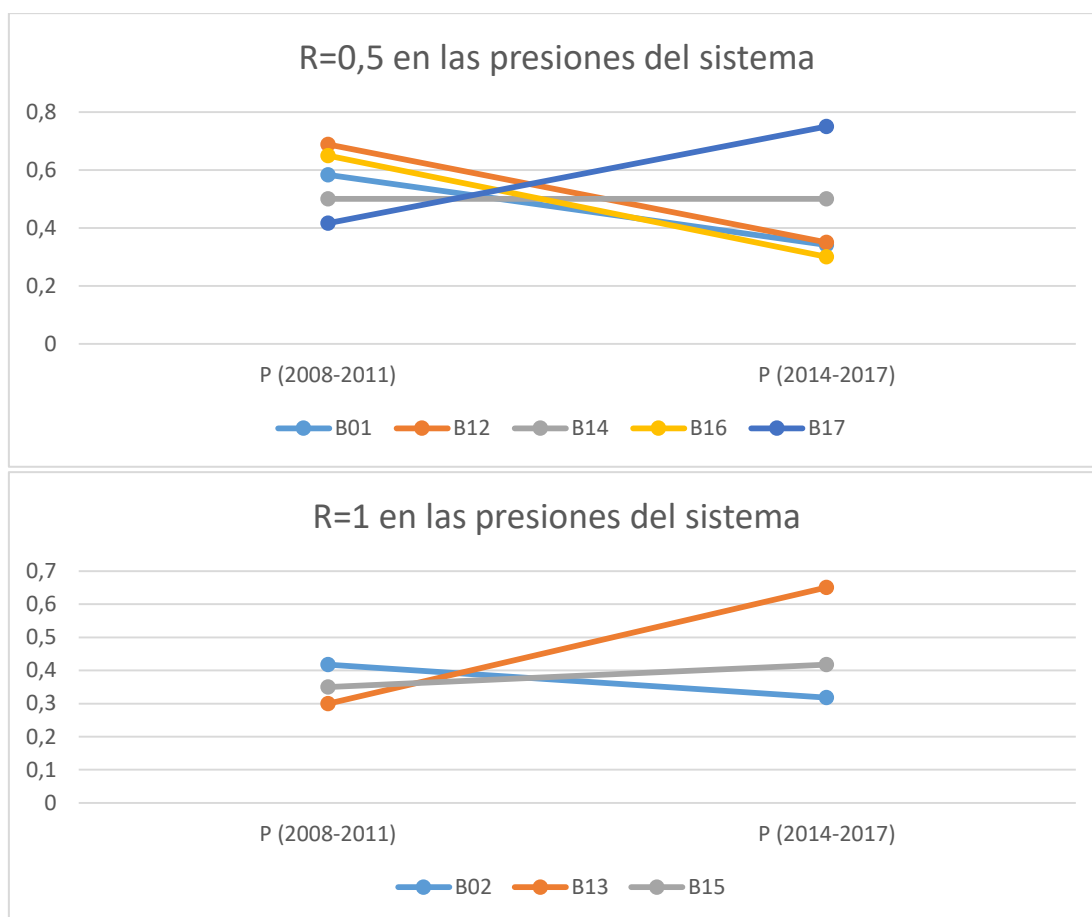


Figura 39. Resultados de los índices de las respuestas del sistema con las presiones del sistema. Imagen superior: estaciones con $R=0,5$. Imagen inferior: estaciones con $R=1$.

6. Discusión

6.1. Tendencia temporal y análisis geográfico de los datos extraídos

Por lo general, se observa una disminución de los niveles de contaminantes analizados en agua río en la estación B01 desde el año 1995 hasta 2017 debido probablemente a la intervención del Passeig Fluvial cuya función fue la descontaminación y la apropiación ciudadana de la zona. En cambio, se puede ver que los niveles de contaminantes de litoral no varían mucho ya que al llegar al mar, se diluyen. Con lo que respecta a los compuestos químicos en aire, no se aprecia disminución seguramente por el aumento de la circulación de vehículos en la zona, a pesar del desmantelamiento de industrias y de descontaminación de río. Además, de las industrias que permanecen en la zona están bajo la legislación ambiental establecida en España que ha estado fijando límites cada vez más estrictos a lo largo de los años ya sea en forma de reales decretos como leyes adaptadas por las directivas europeas.

Además, los residentes de la zona de estudio perciben una mejora notable de un río que llegó a ser el segundo río más contaminante de Europa a ser un espacio donde puede ser ocupada por los ciudadanos y poder conectar con la naturaleza sin llegar a deteriorarla. La disminución en la

concentración de clorofila-a en el litoral se ha reflejado en una disminución de presencia de algas favoreciendo de esta manera el baño público en las playas de la zona.

Geográficamente hablando, no todas las zonas de nuestro objeto de estudio han disminuido de la misma forma debido a que sólo se han realizado intervenciones en los últimos años en zonas determinadas. Por ejemplo, se puede ver que las estaciones del río (B01 B02) y las estaciones situadas en la desembocadura del río (B06, B07 y B08) siguen siendo las más contaminadas de las estaciones analizadas debido a la alta contaminación que descarga el río al mar.

Con lo que respecta al análisis geográfico de la contaminación del aire, es muy difícil conocer qué zonas son las más contaminantes debido a su alta difusión. Pero los contaminantes más abundantes son los gases óxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno en la mayoría de las estaciones.

En general, no se han podido obtener datos de todos los años en las estaciones seleccionadas. A pesar de ello, se ha podido hacer un análisis geográfico de tendencia temporal con los datos extraídos.

6.2. Las presiones, estados y respuestas del sistema (2008-2011)

Se han podido obtener resultados de los indicadores de aire agua y estado trófico aplicando los indicadores ambientales propuestos en esta tesis sobre los datos extraídos en los años 2008 y 2011.

Con lo que respecta a la presión del sistema de entre los años 2008 y 2011, se puede ver en general ha habido una ligera mejora en los niveles analizados. Concretamente en aguas subterráneas y río ya que en la mayoría de casos los valores se sitúan por encima del 0,5 en cada contaminante. En cambio, en el indicador de clorofila-a se puede ver que sólo dos estaciones superan la ponderación de 0,5. Finalmente, los indicadores de aire en la presión del sistema varían del 0 al 1, pero el indicador que mayor valor tiene es el óxido de nitrógeno. Estos valores indican que en el río y en las aguas subterráneas tuvieron mayor afectación la intervención del proyecto Passeig Fluvial.

En el estado del sistema del año 2011 se puede ver que en el litoral que tiene buen estado ambiental con referencia a los límites establecidos a pesar de visualizarse unos valores más bajos en la desembocadura del río debido a la carga de contaminante que proviene del río y que aún no se ha disuelto con la masa de agua de costa. En cambio, en el río y en aguas subterráneas se puede ver que los indicadores reflejan que tienen un pésimo estado ambiental a excepción de algunos indicadores. Por lo que aún hay margen de mejora en la zona.

En la respuesta del sistema, no todas las estaciones tienen la ponderación más alta ya que en no en todas las zonas se ha intervenido. Pero en todas las estaciones tienen un mínimo de 0,5 ya que en todas ha habido monitorización. Es lógico ya que se han escogido las estaciones que monitorean. En caso de analizar valores de contaminantes o de clorofila-a en un periodo de años en una estación sin valores en dicho periodo de tiempo, la ponderación en el indicador de monitorización sería cero.

6.3. Indicadores agregados de calidad ambiental

Debido a la falta de datos en los años 2014 y 2017, no se ha podido hacer una comparación más completa de entre los dos periodos puesto que sólo se han obtenido datos hidrológicos del río y datos del aire. A pesar de ello, se ha podido aplicar la metodología propuesta en esta tesis de máster.

Los valores de los índices de las presiones del sistema fueron en algunas estaciones superiores que en el periodo anterior y en otras estaciones fueron inferiores. Si se hace la comparación entre las presiones del río de los dos periodos, tiene sentido que la presión sea menor en el segundo periodo de tiempo ya que aplicando la misma respuesta en este caso puede mejorar el estado ambiental del río pero la tendencia no es lineal puesto que las concentraciones de los contaminantes en agua cada vez son más difíciles de disminuir.

Con lo que respecta a los valores de los índices de estado del sistema, tienden a crecer en las estaciones del río ya que su estado ambiental ha ido mejorando a lo largo de los años seleccionados debido al tratamiento de humedales del proyecto Passeig Fluvial. Los valores de los índices de estado de algunas de las estaciones del aire son más altos y en otras estaciones del aire son más bajos. Este comportamiento se debe a que, además de la disminución de contaminación del río, ha aumentado la circulación de coches en la zona. Por lo que es un agente externo que altera el índice del aire de cada estación puesto que la mayor fuente de contaminación del aire procede de la combustión de los vehículos.

Por otro lado, se puede ver claramente que no existe una correlación entre la respuesta del sistema con las presiones y los estados del sistema ya que una mejor respuesta del sistema no implica una mejora en las presiones ni en los estados. Por lo que es posible que las respuestas no hayan sido adecuadas para esta tesis o se han necesitado más indicadores ambientales de respuesta.

Observando los resultados de las respuestas del sistema sobre los estados y presiones del sistema, se puede decir que nuestras respuestas tienen correlación con algunos estados y presiones del sistema de algunos de los indicadores ambientales propuestos. Por otro lado, no existe una correlación entre las respuestas del sistema con los estados y presiones del sistema en los índices. La falta de correlación puede deberse a la necesidad de aplicar el método de PSR en un periodo de tiempo más largo o debido a que los indicadores ambientales como respuesta del sistema no fueron adecuados.

A pesar de la cantidad de retos en una planificación de la implementación y la ingeniería de la sostenibilidad, no hay un conjunto claro de indicadores para evaluar la sostenibilidad de una zona [79].

7. Conclusiones

Esta tesis final de máster ha presentado una aproximación de análisis ambiental cuyo objetivo general de la investigación ha sido aportar elementos útiles de análisis en una zona donde se quiere estudiar su calidad ambiental. Para ello, se han utilizado una metodología de indicadores ambientales basada en el método PSR. Se espera que esta tesis, además de tener una interpretación de la situación ambiental de la zona del Besòs, pueda ser de herramienta para analizar la situación ambiental de la zona y del periodo de tiempo que se desea estudiar.

Los indicadores ambientales utilizados en esta tesis han sido a partir de los datos hidrológicos y del aire proporcionados por la ACA y del departamento de territorio y sostenibilidad de la Generalitat de Catalunya respectivamente. Indicadores que pueden representar la calidad ambiental de la zona de estudio.

- Objetivo 1: Se ha podido realizar un análisis histórico y geográfico del que se observa cómo históricamente ha disminuido la contaminación del agua de la zona del Besòs. A pesar de ello, no es suficiente ya que siguen habiendo contaminantes que siguen sobrepasando los límites recomendados por la OMS que ponen en riesgo la salud humana. Con lo que respecta al histórico del aire, se ha mantenido en los mismos niveles en los últimos años ya que, aunque se hayan desmantelado industrias en la zona, ha aumentado el problema de la contaminación atmosférica procedente de los vehículos. Finalmente, se puede observar que el estado tráfico ha mejorado ligeramente en el litoral pero sin cambios significativos.
- Objetivo 2: Se ha podido elaborar un conjunto de indicadores e índices ambientales mediante metodologías referenciadas que representan el estado ambiental de la zona en los periodos escogidos. Además, pueden ser aplicables a otras zonas donde se puedan recoger datos de variables químicas de agua y aire que puedan representar el estado ambiental de la zona.
- Objetivo 3: Los resultados obtenidos mediante la metodología utilizada en esta tesis de máster han representado la situación ambiental de la zona del Besòs del que se puede ver que existe una mejora ambiental pero insuficiente ya que se pretende conseguir una zona con contaminantes con niveles por debajo de lo establecido entre las leyes ambientales.
- Objetivo 4: La aplicación de la metodología en los años 2014 y 2017 ha sido posible únicamente en las variables que representan el estado ambiental del río y del aire. Con ello se ha podido ver que hay indicadores ambientales que aumentan y otras que disminuyen sus niveles a lo largo de los años, lo cual significa que no todas las concentraciones de los contaminantes están disminuyendo. Algo que se tiene que tener en cuenta si se quiere mejorar la situación ambiental de la zona.
- Objetivo 5: Por otro lado, los indicadores ambientales propuestos en la respuesta del sistema no tienen correlación total con los indicadores ambientales de la presión y estado del sistema. Es posible que se deba a que estos indicadores no hayan sido los adecuados o que los factores externos tales como el aumento del tráfico de la zona hayan influido.

7.1. Trabajo futuro

En la tesis final de máster, se proponen a continuación algunas investigaciones y acciones a seguir desarrollando para dar continuidad a esta tesis:

- Ampliar la metodología incluyendo indicadores ambientales de los contaminantes del suelo y de la biodiversidad de la zona. Más factores ambientales se considere en la metodología, mayor interpretación de la zona para determinar su estado ambiental.
- Ampliar la metodología incluyendo indicadores sociales mediante encuestas y cuestionarios. Es importante obtener la percepción del ciudadano que vive en la zona para la toma de decisiones, de forma que puedan establecerse los mecanismos adecuados. La defensa del medio ambiente no puede desarrollarse sin la colaboración activa de los ciudadanos, lo que implica por un lado, una mayor participación de éstos, y por otro, una actitud que subordine sus intereses particulares a los bienes compartidos.
- Aplicar la metodología en otras cuencas del litoral catalán.

8. Bibliografía

- [1] Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W., 1972. *The Limits to Growth*. Universe Books, New York.
- [2] Monro, D., and M. Holdgate (eds.). 1991. *Caring for the Earth—a strategy for sustainable living*. IUCN, UNEP, WWF, Gland, Switzerland.
- [3] United Nations General Assembly (2015), “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution A/RES/70/1.” New York, p. 35, 2015.
- [4] Corcoran et al. (2010). *Sick Water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development*, ONU-Hábitat/PNUMA/ GRID-Arendal, Nairobi.
- [5] UNDP (2016). *UNDP support to the implementation of sustainable development goal 6. Sustainable management of water and sanitation*.
- [6] OCDE (2012). *Perspectivas ambientales hacia 2050*, OCDE, París.
- [7] UNDP (2016). *UNDP support to the implementation of sustainable development goal 3. Ensure healthy lives and promote wellbeing for all at all ages*.
- [8] UNDP (2016). *UNDP support to the implementation of sustainable development goal 14. Ocean governance*.
- [9] UNDP (2016). *UNDP support to the implementation of sustainable development goal 15. Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems*.
- [10] DEAT (Department of Environmental Affairs and Tourism) 1996. *Integrated pollution control and waste management: the need for integrated pollution control in South Africa*. DEAT, Pretoria, 57 pp.
- [11] Viessmann W (1990) Water management issues for the nineties. *Water Resour Bull* 26(6):886–891
- [12] Ferrer Graciela, Ballester Alba. *La importancia social del agua: intereses y valores en juego*. Guía Nueva Cultura del Agua. Agua y sociedad: Articulación de valores e intereses en conflicto. < <https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/agua-y-sociedad/la-importancia-social-del-agua?&imprimir=1>>
- [13] (The United Nations (2017). *Wastewater: The untapped resource*. The United Nations World Water Development Report 2017.). <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002471/247153e.pdf>>
- [14] UN Water, “Water and Sanitation Interlinkages across the 2030 Agenda for Sustainable Development,” Geneva, 2016.

- [15] Organización Mundial de la Salud (2017). Guías para la calidad del agua potable. Vol. 1. Tercera edición.
- [16] The European Commission, 2007. Final report on Establishment of a list of chemical parameters for the revision of the Drinking Water Directive. ENV.D.2/ETU/2007/0077r
- [17] OMS, 2003: *Chloride in drinking-water*. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/3).
- [18] Ronald B. Brown, Mohammed S. Razzaque , Phosphate toxicity and tumorigenesis. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer.
- [19] Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente (2017). Manual de interpretación y elaboración de informes. Sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Directiva 91/271/CEE. <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/03_Manual_Directiva_91_271_CEE_tcm30-214069.pdf>
- [20] S.K. Gupta, A.B. Gupta, R. Gupta. Pathophysiology of Nitrate Toxicity in Humans in View of the Changing Trends of the Global Nitrogen Cycle With Special Reference to India. The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies. 2017, Pages 459–468.
- [21] OMS, 2003: *Nitrate and nitrite in drinking-water*. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/56).
- [22] OMS, 2003: *Sodium in drinking-water*. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/15).
- [23] OMS, 2003: Total dissolved solids in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud (WHO/SDE/WSH/03.04/16).
- [24] World Health Organization (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.
- [25] Igor Bagayev, Julie Lochard. EU air pollution regulation: A breath of fresh air for Eastern European polluting industries?. Journal of Environmental Economics and Management 83 (2017) 145-163.
- [26] Katsouyanni K, Touloumi G, Samoli E, Gryparis A, Le Tertre A, Monopolis Y, et al. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 Project. Epidemiology. 2001;12:521-31.
- [27] Sunyer J, Ballester F, Tertre AL, Atkinson R, Ayres JG, Forastiere F, et al. The association of daily sulfur dioxide air pollution levels with hospital admissions for cardiovascular diseases in Europe (The APHEA2- study). Eur Heart J. 2003; 24:752-60.
- [28] Medina S, Plasencia A, Ballester F, Mücke HG, Schwartz J, por el Apehis Group. Apehis: public health impact of PM10 in 19 European cities. J Epidemiol Community Health. 2004;

58:831-6.

- [29] Alonso E, Martínez T, Cambra K, López L, Boldo E, Zorrilla B, et al. Evacuación en cinco ciudades españolas del impacto en salud de la contaminación atmosférica por partículas. Proyecto europeo APHEIS. *Revista Española de Salud Pública*. 2005;79:297-308.
- [30] EMECAM. El proyecto EMECAM: estudio español sobre la relación entre la contaminación atmosférica y la mortalidad. *Rev Esp Salud Pública*. 1999;73:165-314.
- [31] Sáez M, Ballester F, Barceló MA, Pérez-Hoyos S, Tenías JM, Bellido J, et al. A combined analysis of the short-term effects of photochemical air pollutants on mortality within the EMECAM project. *Environ Health Perspect*. 2002;110: 221-8.
- [32] Ballester F, Rodríguez P, Iñiguez C, Sáez M, Daponte A, Galán I, et al. Air pollution and cardiovascular admissions short-term relationship in Spain: results within the EMECAS project. *J Epidemiol Community Health*. 2006;60:328-36.
- [33] Ballester F. Vigilancia de los riesgos ambientales en salud pública. El caso de la contaminación atmosférica. *Gac Sanit*. 2005;19:253-7.
- [34] De Leeuw F, Sluyter R, Van Breugel P, Bogman F. Air pollution by ozone in EU in 1999 and the summer of 2000. European Environmental Agency Tepic Report, 1/2001. Copenhagen: EEA; 2001.
- [35] Querol X, Alastuey A, Rodríguez S, Viana M, Artiñano, B, Salvador P, et al. Levels of PM in rural, urban and industrial sites in Spain. *The Science of Total Environment*. 2004;334-5:359-76.
- [36] Querol X, Alastuey A, Rodríguez S, Viana M, Artiñano, B, Salvador P, et al. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in Spain. *J Aerosol Sciences*. 2004;35:1151-72
- [37] Salvador P, Artiñano B, Alonso D, Querol X, Alastuey A. Identification and characterisation of sources of PM10 in Madrid (Spain) by statistical methods. *Atmospheric Environment*. 2004;38:435-47.
- [38] Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, Mantilla E. Origin of high summer PM10 and TSP concentrations at rural sites in Eastern Spain. *Atmospheric Environment*. 2002;36:3101-12.
- [39] Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, Plana F. Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric aerosol in the Western Mediterranean. *J Geophysical Res*. 2002;107:D24,4777, doi:10.1029/2001JD001488
- [40] Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, Kallos G, Kakaliagou O. Saharan dust inputs to suspended particles time series (PM10 and TSP) in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*. 2001;35:2433-47.
- [41] Escudero M, Castillo S, Querol X, Ávila A, Alarcón M, Viana MM, et al. Wet and dry African dust episodes over Eastern Spain. *J Geophysical Res*. 2005;110, D18S08, doi:10.1029/2004JD00473.
- [42] Katsouyanni K, Zmirou D, Spix C, Sunyer J, Shoutten JP, Ponka A y cols. Short-term effects of air pollution on health: a European approach using epidemiologic time series data. The Apha project: background, objectives, design. *Eur Respir J* 1995;8:1030-8.

- [43] Costa M, Baldasano JM. Development of a source emission model for atmospheric pollutants in the Barcelona area. *Atmospheric Environment* 1996;30A:309-18.
- [44] Sunyer J, Antó JM, Murillo C, Sáez M. Air pollution and emergency room admissions for chronic obstructive pulmonary diseases. *Am J Epidemiol* 1991;134:277-86.
- [45] Sunyer J, Sáez M, Murillo C, Castellsagué J, Martínez J, Antó JM. Air Pollution and emergency room admissions for chronic obstructive pulmonary diseases. *Am J Epidemiol* 1993;137:701-5.
- [46] Castellsagué J, Sunyer J, Sáez M, Antó JM. Short-term association of urban air pollution with emergency room visits for asthma. *Thorax* 1995;50:1051-6.
- [47] Sunyer J, Castellsagué J, Sáez M, Tobías A, Antó JM. Air pollution and mortality in Barcelona. *J Epidemiol Community Health* 1996;50(supl):S76-S80.
- [48] Environmental Protection Agency USA (2016). Criteria Air Pollutants. <https://www3.epa.gov/ttnca1/cica/airq_s.html>
- [49] Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente (2017) <<http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/>>
- [50] Raub JA, Mathieu-Nolf M, Hampson NB, Thom SR. Carbon monoxide poisoning — a public health perspective. *Toxicology* 2000;145:1-14
- [51] Yebin Tao, Liuju Zhong, Xiaoliang Huang, Shou-En Lu, Yi Li, Lingzhen Dai, Yuanhang Zhang, Tong Zhu, Wei Huang. Acute mortality effects of carbon monoxide in the Pearl River Delta of China. *Science of the Total Environment* 410–411 (2011) 34–40.
- [52] Rode, M. and Suhr, U. (2007) Uncertainties in Selected River Water Quality Data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 863-874. <https://doi.org/10.5194/hess-11-863-2007>
- [53] Pejman, A.H., Nabi Bidhendi, G.R., Karbassi, A.R., Mehrdadi, N. and Esmaeili Bid-Hendi, M. (2009) Evaluation of Spatial and Seasonal Variations in Surface Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6, 467-476. <https://doi.org/10.1007/BF03326086>
- [54] Chmiel, S., Glowacki, S., Michalczyk, Z. and Sposob, J. (2009) Some Issues in the Assessment of Eutrophication of River Waters as a Consequence of the Construction of a Storage Reservoir (on the Example of the Bystrzyca River). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 9, 175-179. <https://doi.org/10.2478/v10104-010-0013-0>
- [55] M.L. Nollet, S.P. De Gelder (1997) *Water Analysis Hand Book*. 3rd Edition, Hach Company, USA.
- [56] Gestión y Política Ambiental DICTUC S.A. Guía Metodológica de transferencia de beneficios. <http://www.greenlabuc.cl/wp-content/uploads/2017/02/2016-VALCON-Guia-Metodologica_Transferencia-de-Beneficios-Final.pdf>
- [57] Carlson, R.E. (1977) A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22:2 361—369.
- [58] Smeets, E., & Weterings, R. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*, Report nr 25. Copenhagen: European Environment Agency.

- [59] Niemeijer, D., & de Groot, R. (in review). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecological Indicators* (submitted).
- [60] Bakkes, J.A., van den Born, G.J., Helder, J.C., Swart, R.J., Hope, C.W., & Parker, J.D.E. (1994). An overview of environmental indicators: State of the art and perspectives, Report nr UNEP/EATR.94-01;RIVM/.402001001. Nairobi/Bilthoven: UNEP/RIVM.
- [61] Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente (2017) <<http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/informacion-ambiental-indicadores-ambientales/>>
- [62]Chaves H, Alipaz S (2007) An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. *Water Resour Manag* 21(5):883–895
- [63] Hammond, A., Adriaanse, A., Rodenburg, E., Bryant, D., & Woodward, R. (1995). *Environmental indicators: A systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development*. Washington, D.C.: World Resources Institute.
- [64] OECD 1999a, *Environmental indicators for agriculture: Volume 1 concepts and frameworks*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- [65] Artigas y Mas 2005, vol. 2, p. 67 y ss, donde se reproduce el edificio y detalla el proceso de ampliación de dicha fábrica hasta su traslado al barrio portuario de la Barceloneta.
- [66] Artigas y Mas 2005, vol. II, p.67 y ss.
- [67] Capel y Tatjer 1994, p. 1087-88.
- [68] Sobre el Plan de la Ribera veáse Clavera 1973 y Tatjer 1973.
- [69] Sánchez 1996.
- [70] Nadal y Tafunell 1992, Cuadro 10, p. 331.
- [71] Clusa 1980, p. 160.
- [72] Sobre la trayectoria de estudios y propuestas para conocer y conservar el patrimonio industrial de Barcelona veáse Clarós, Tatjer et al., 2004 y Grup de Patrimoni Industrial del Forum de la Ribera del Besòs 2005.
- [73] Stefano Portelli. *La ciutat horitzontal. Urbanisme i resistència en un barri de cases barates de Barcelona. Cultura tradicional. Temes d'Etnologia de Catalunya*, 26.
- [74] Agència Catalana de l'Aigua (ACA) (2018). <http://aca-web.gencat.cat>
- [75] <http://dtes.gencat.cat/icqa/>
- [76] Boletín Oficial Del Estado. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. < <http://www.boe.es/boe/dias/2011/01/29/pdfs/BOE-A-2011-1645.pdf>>
- [77] OECD, 1982. *Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control*. OECD, Paris, 154 pp.
- [78] Perez-Foguet and Gine (2011). Analyzing Water Poverty in Basins. *Water Resour Manage* 25:3595-3612

[79] Goudie D (2009) The emergent science of engineering and sustainable urban environment. *Water Air Soil Pollut* 9:469–484

ANEXO I: Análisis histórico y geográfico de la contaminación de agua

Litoral Besòs

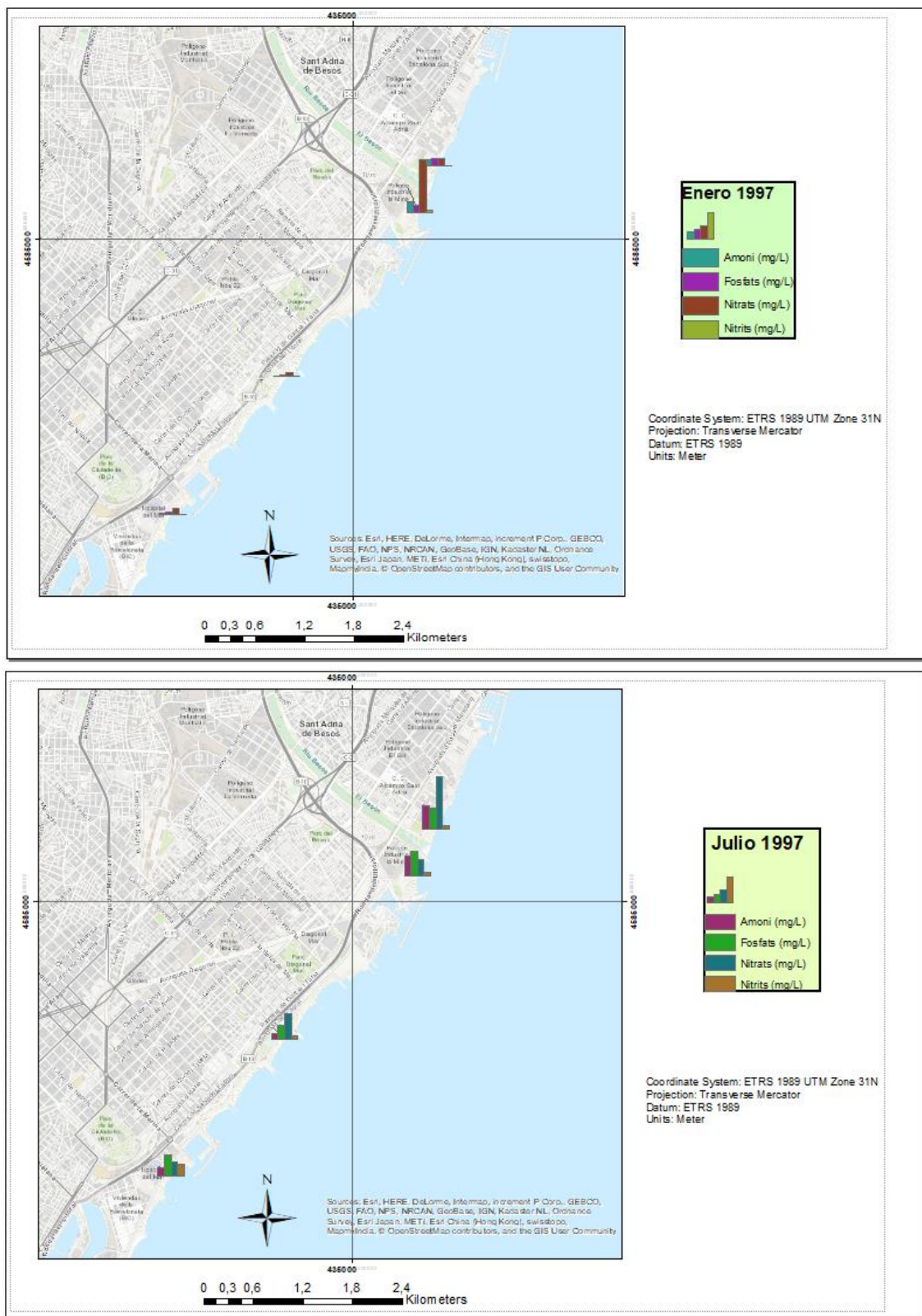


Figura 40. Análisis geográfico de las estaciones del litoral en el año 1997.

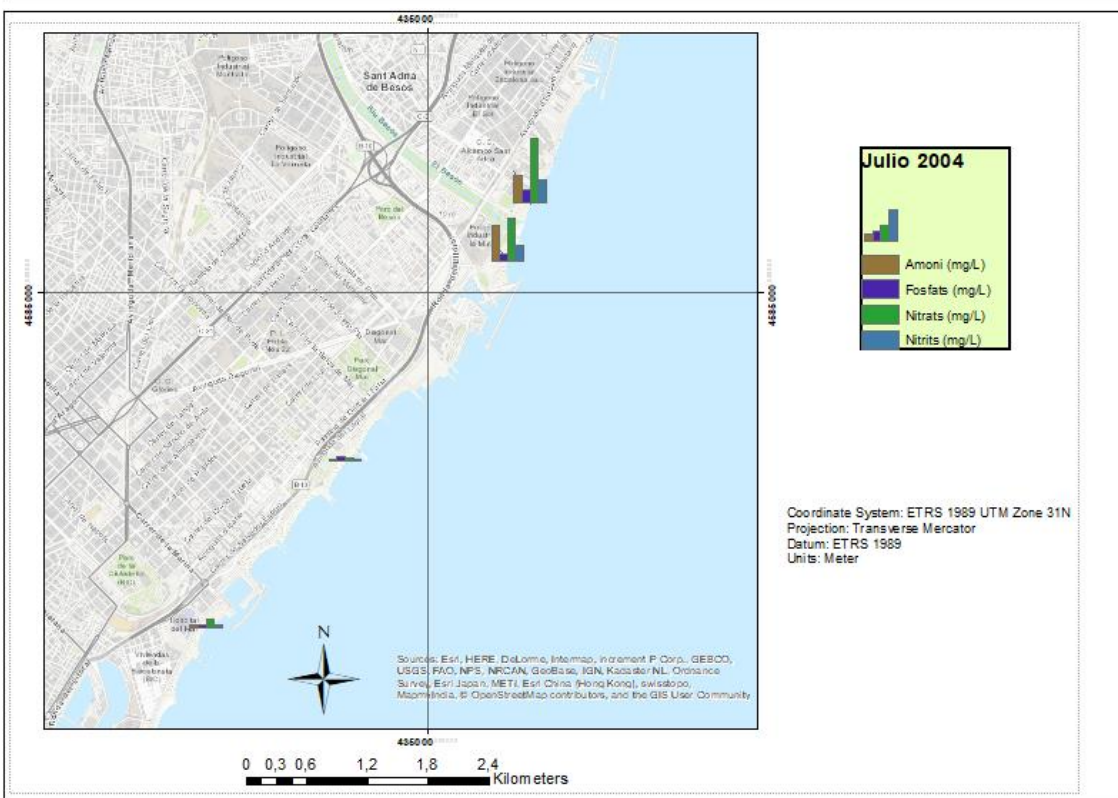
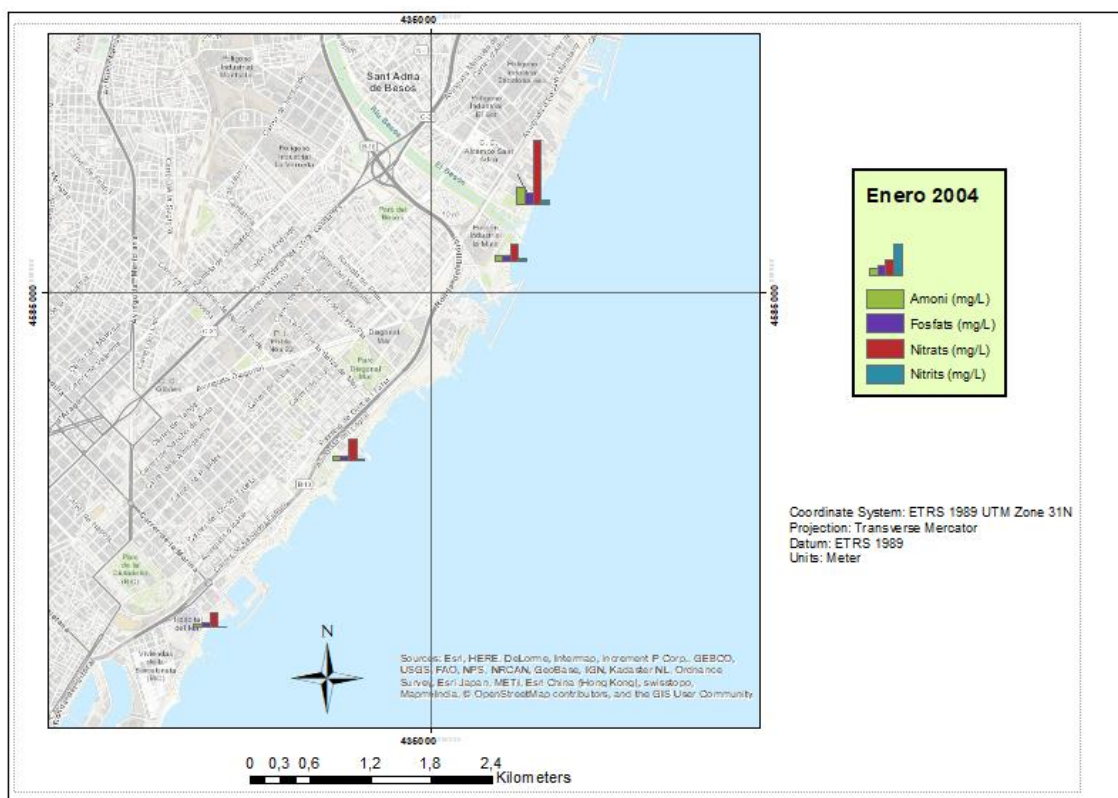


Figura 41. Análisis geográfico de las estaciones del litoral en el año 2004.

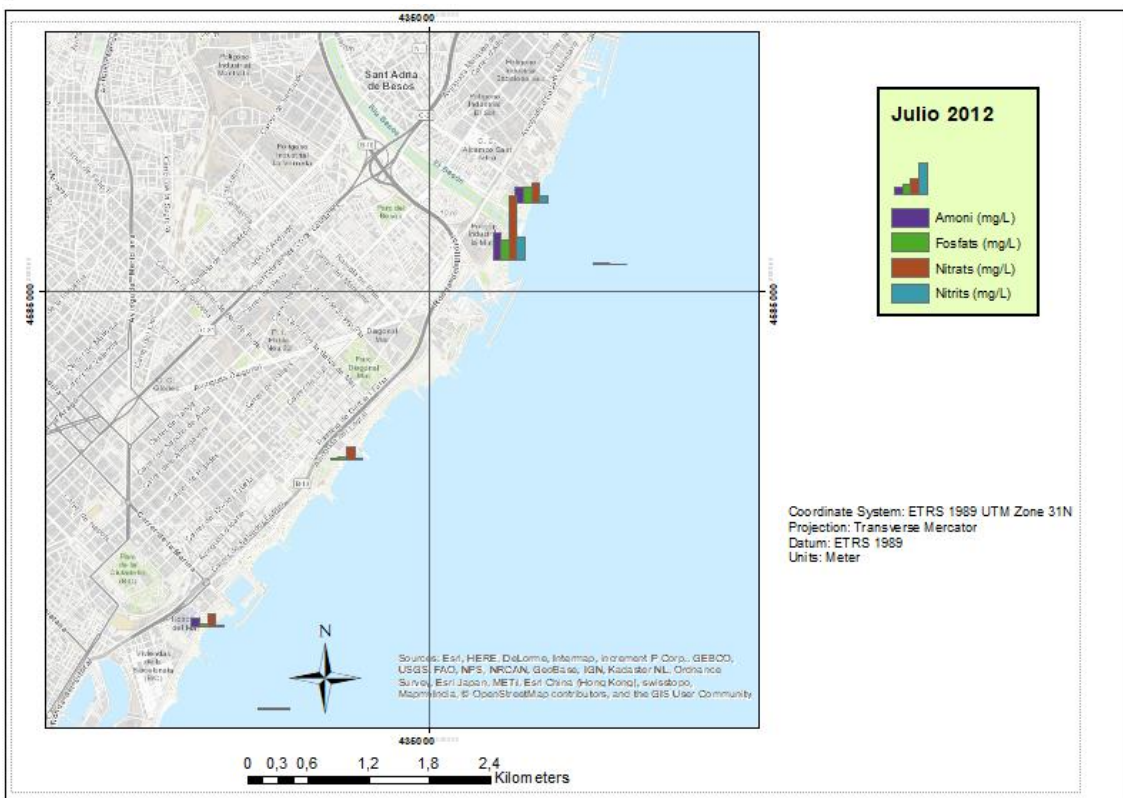
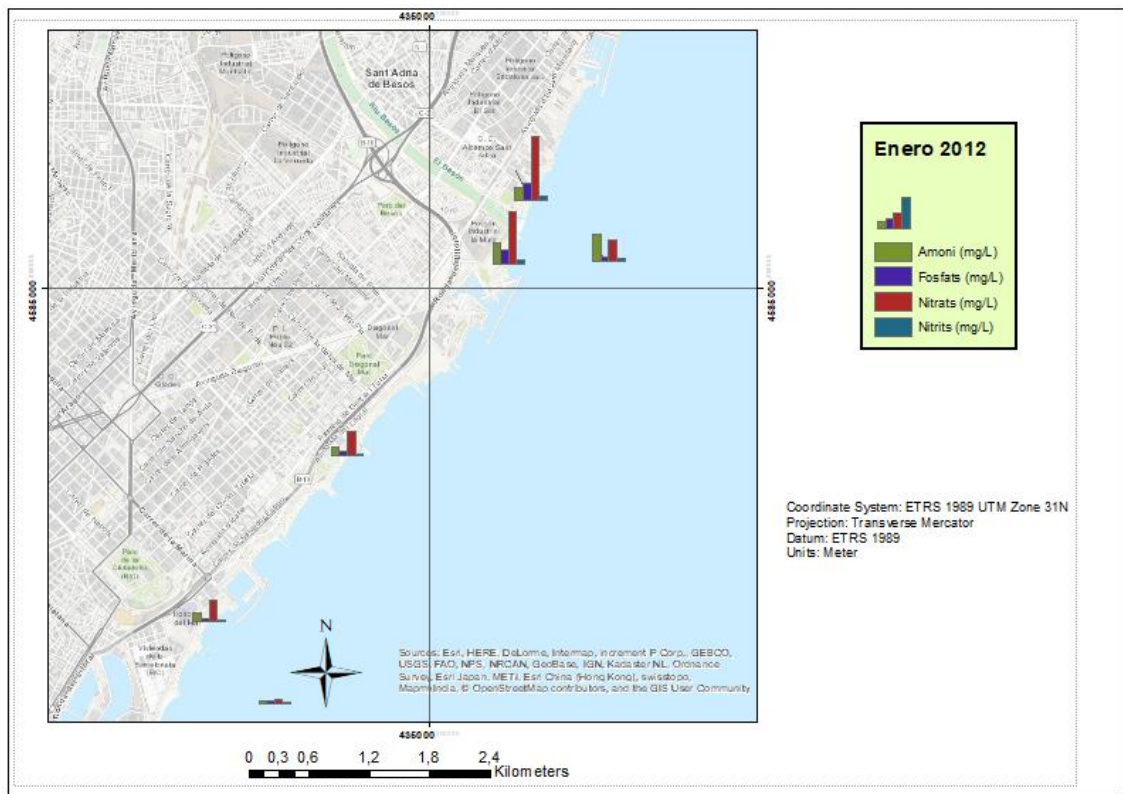


Figura 42. Análisis geográfico de las estaciones del litoral en el año 2012.

Río Besòs

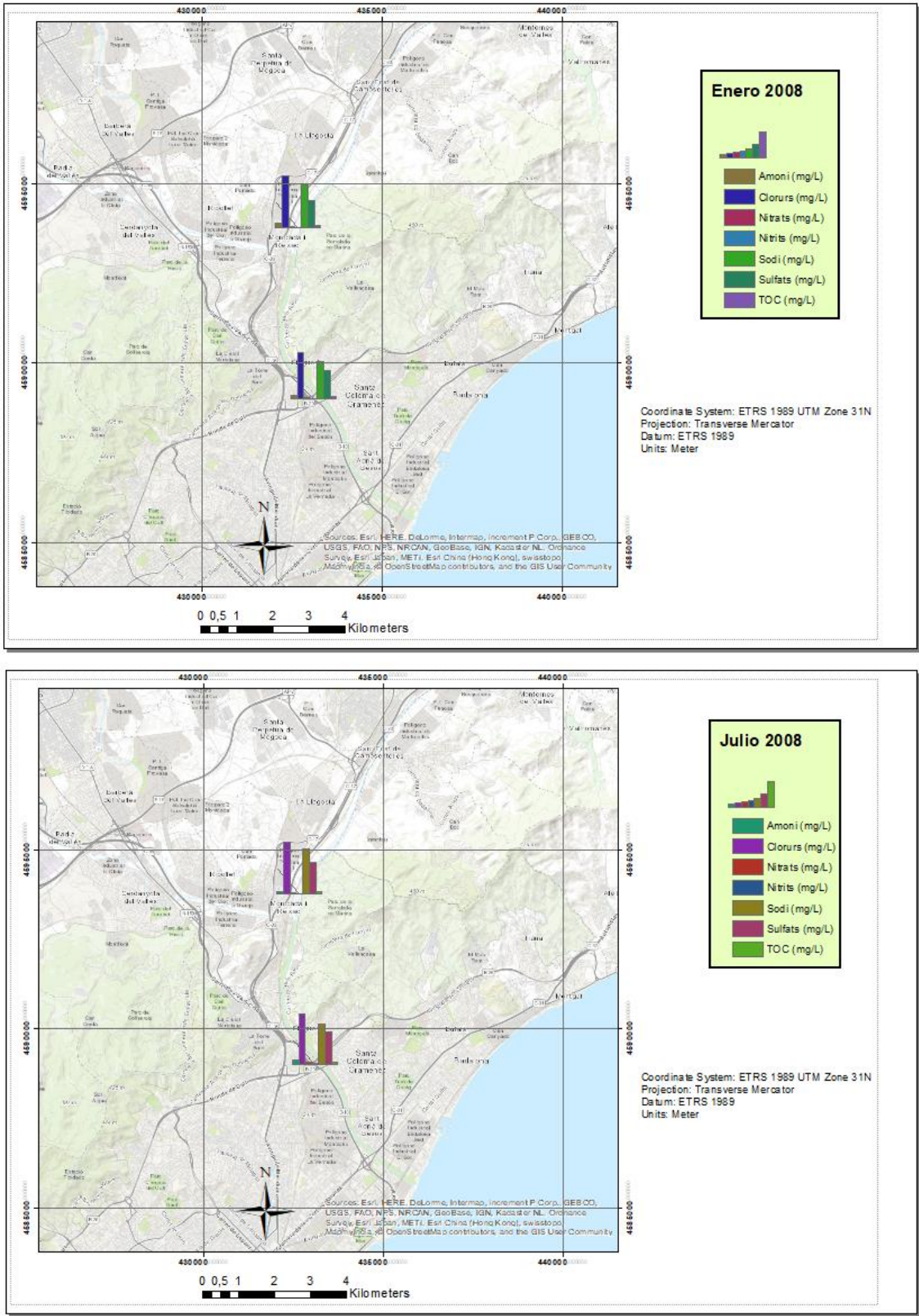


Figura 43. Análisis geográfico de las estaciones del río en el año 2008.

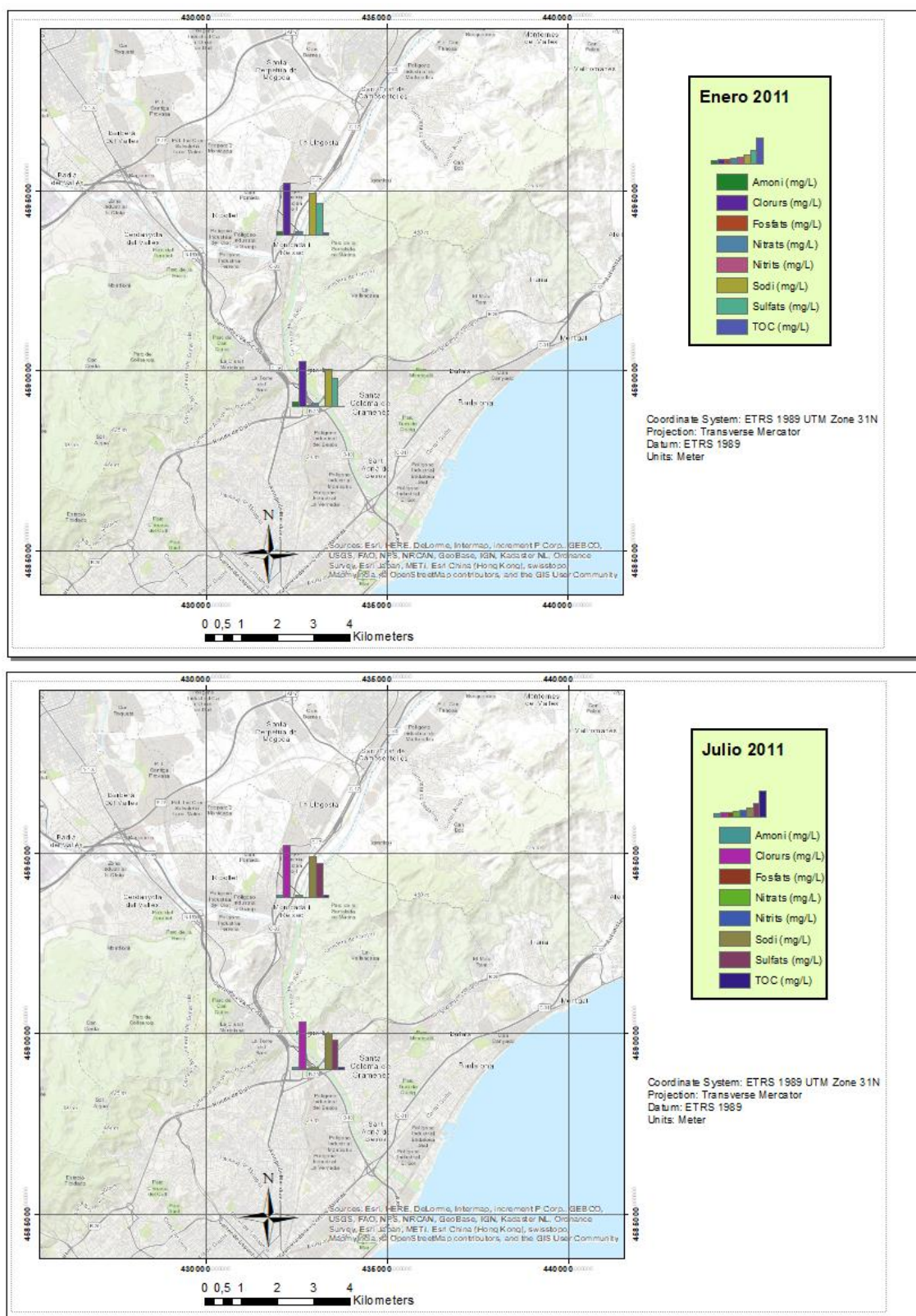
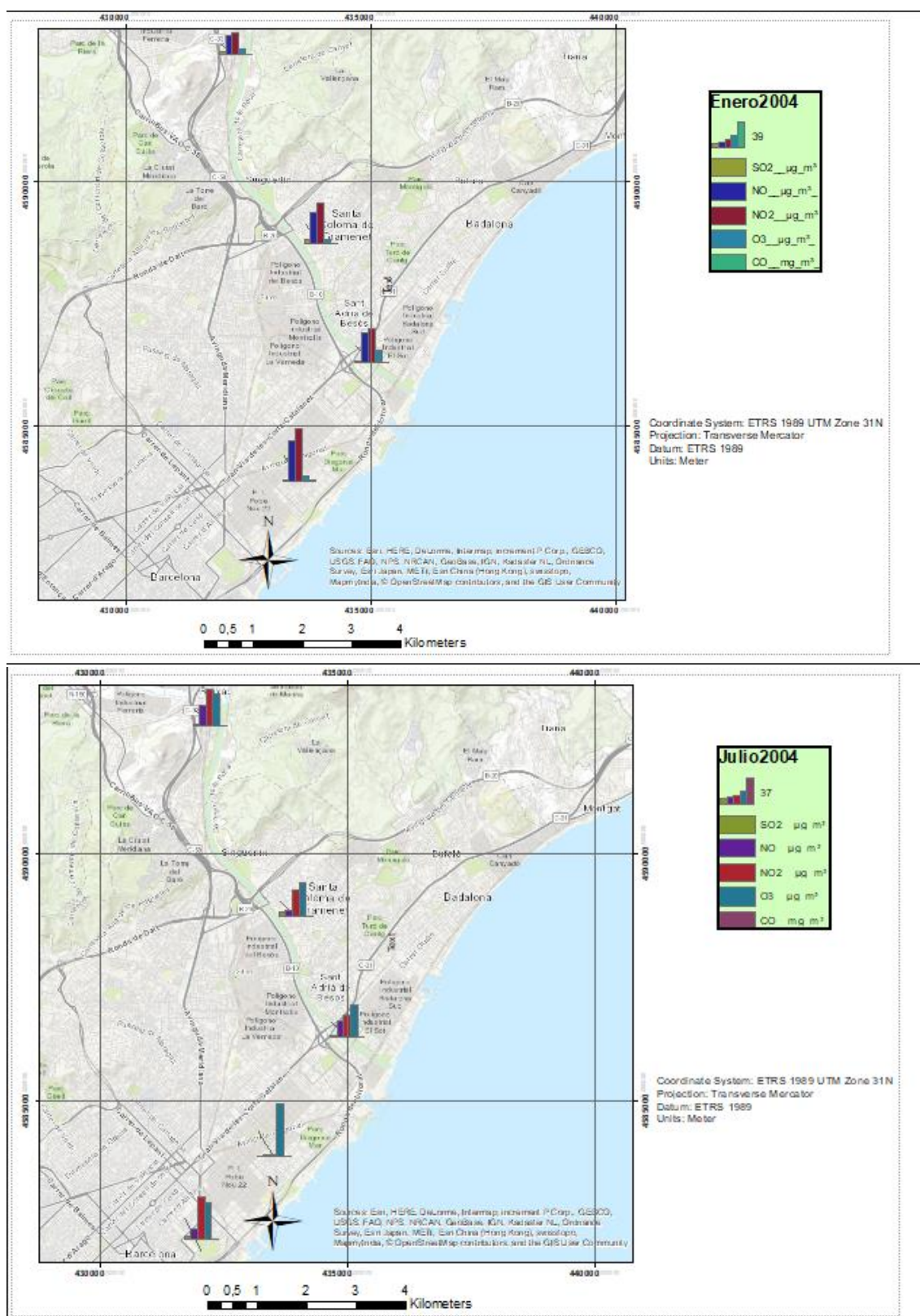


Figura 44. Análisis geográfico de las estaciones del río en el año 2011.

ANEXO II: Análisis histórico y geográfico de contaminación del aire



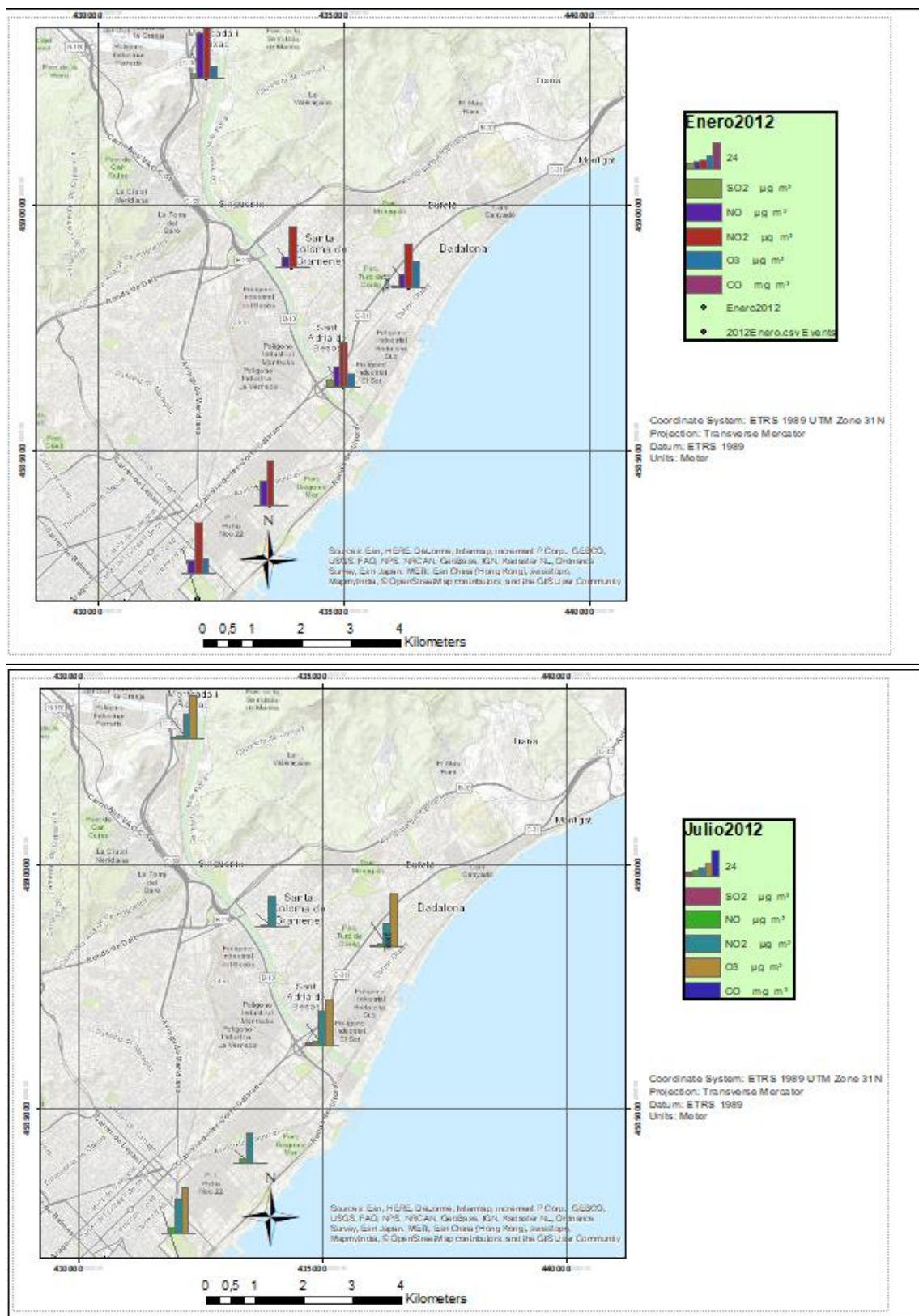
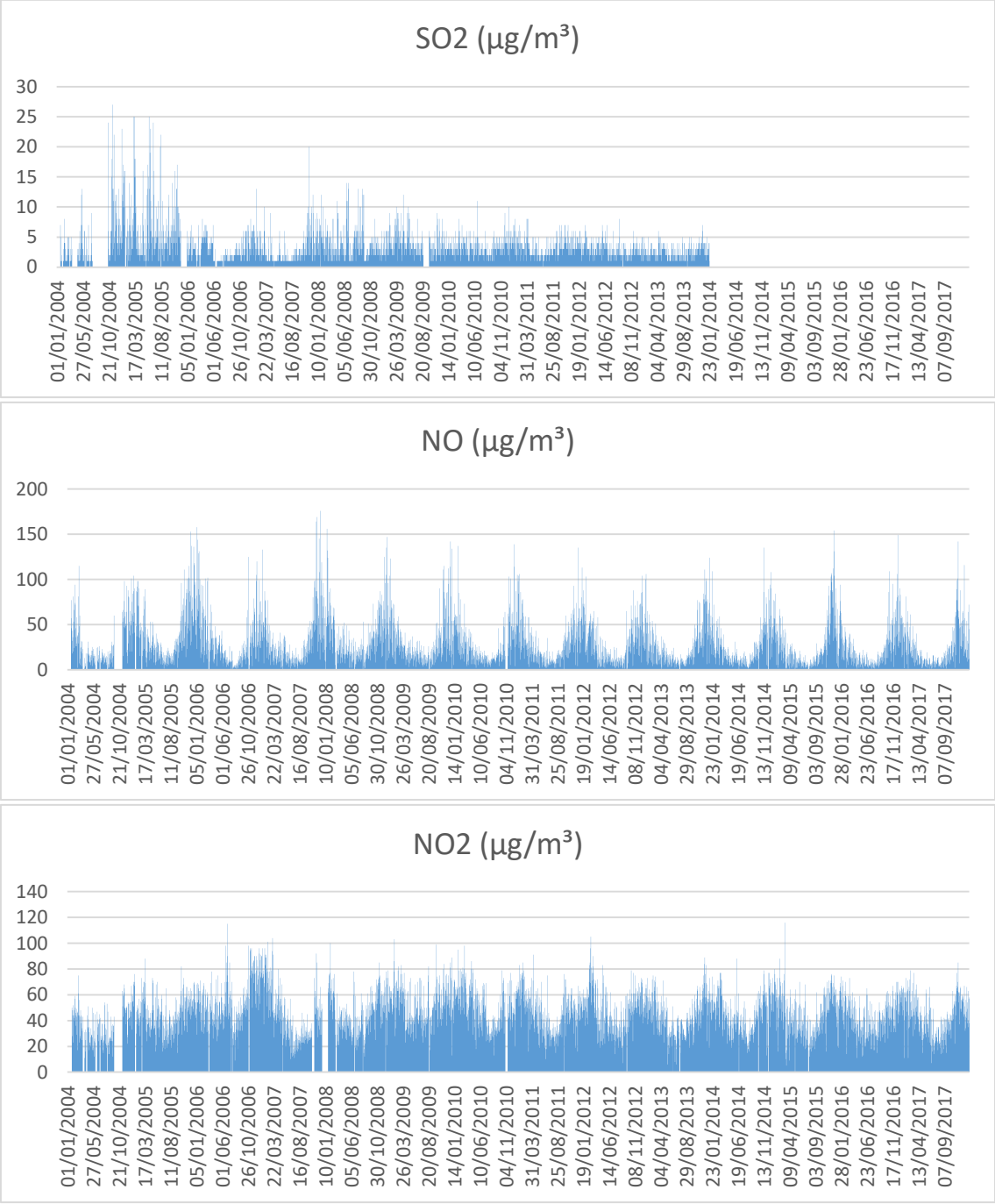


Figura 46. Análisis geográfico de las estaciones del aire en el año 2012.

Estación B15



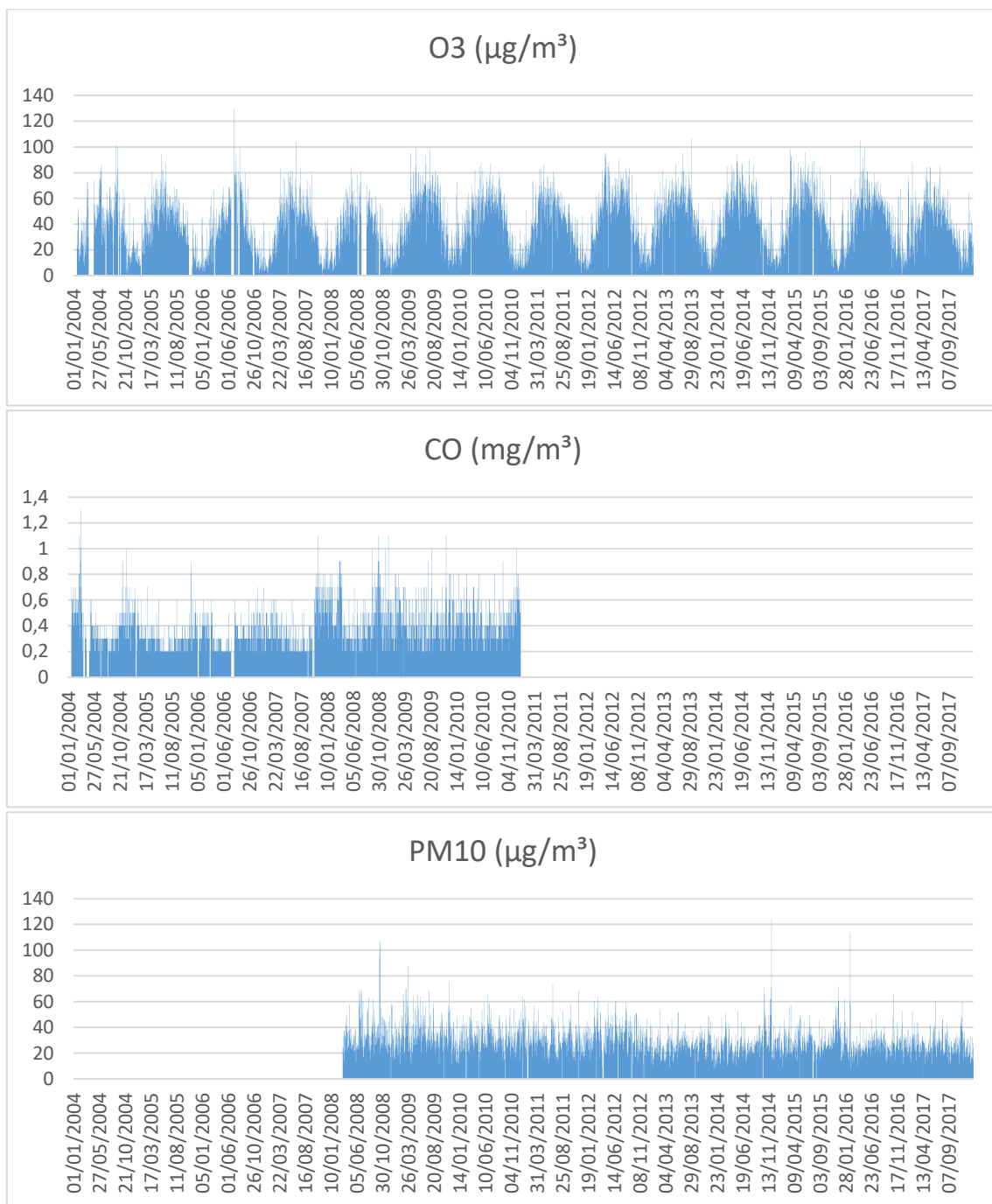
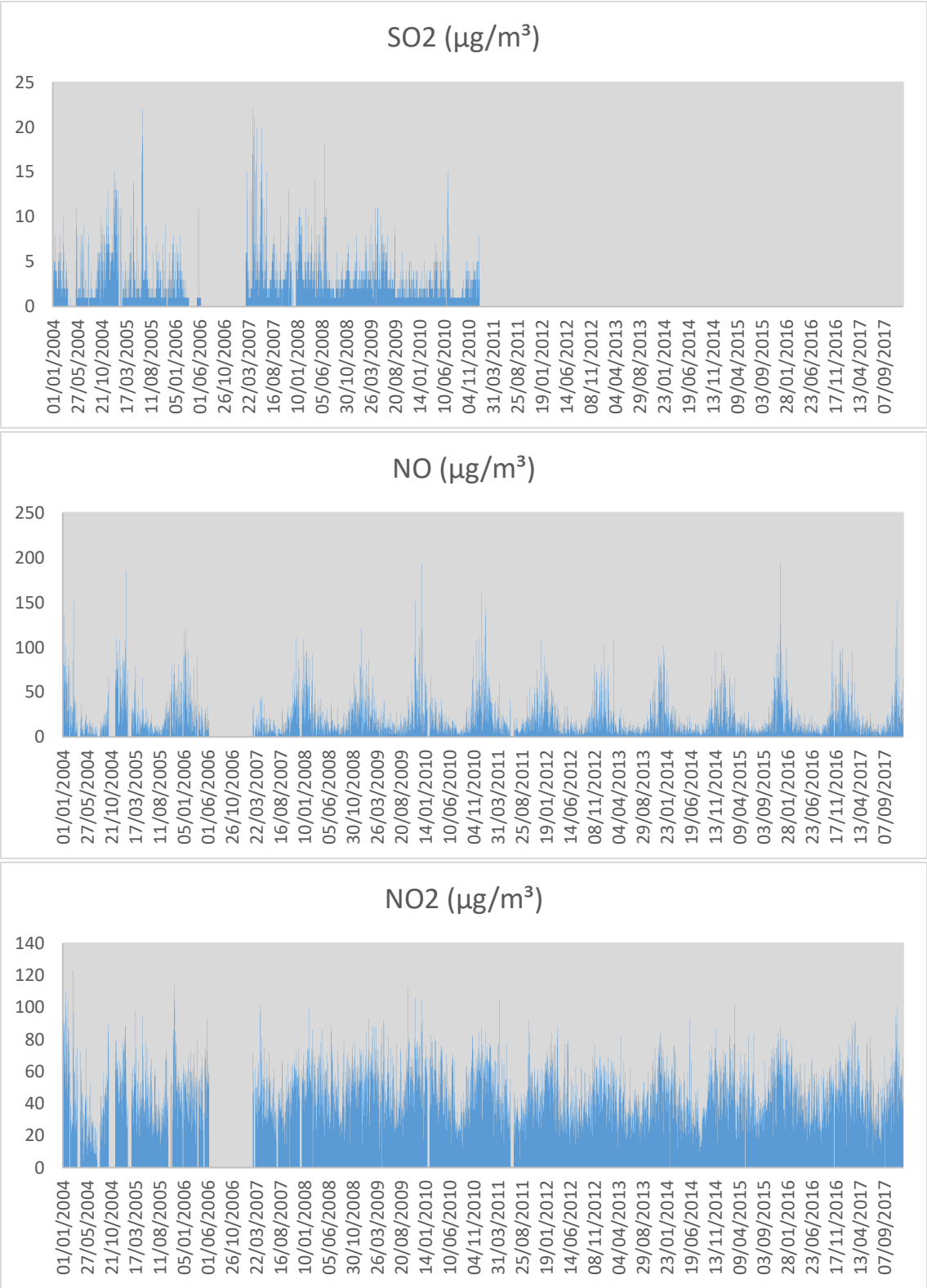


Figura 47. Tendencias de los contaminantes del aire.

Estación B16



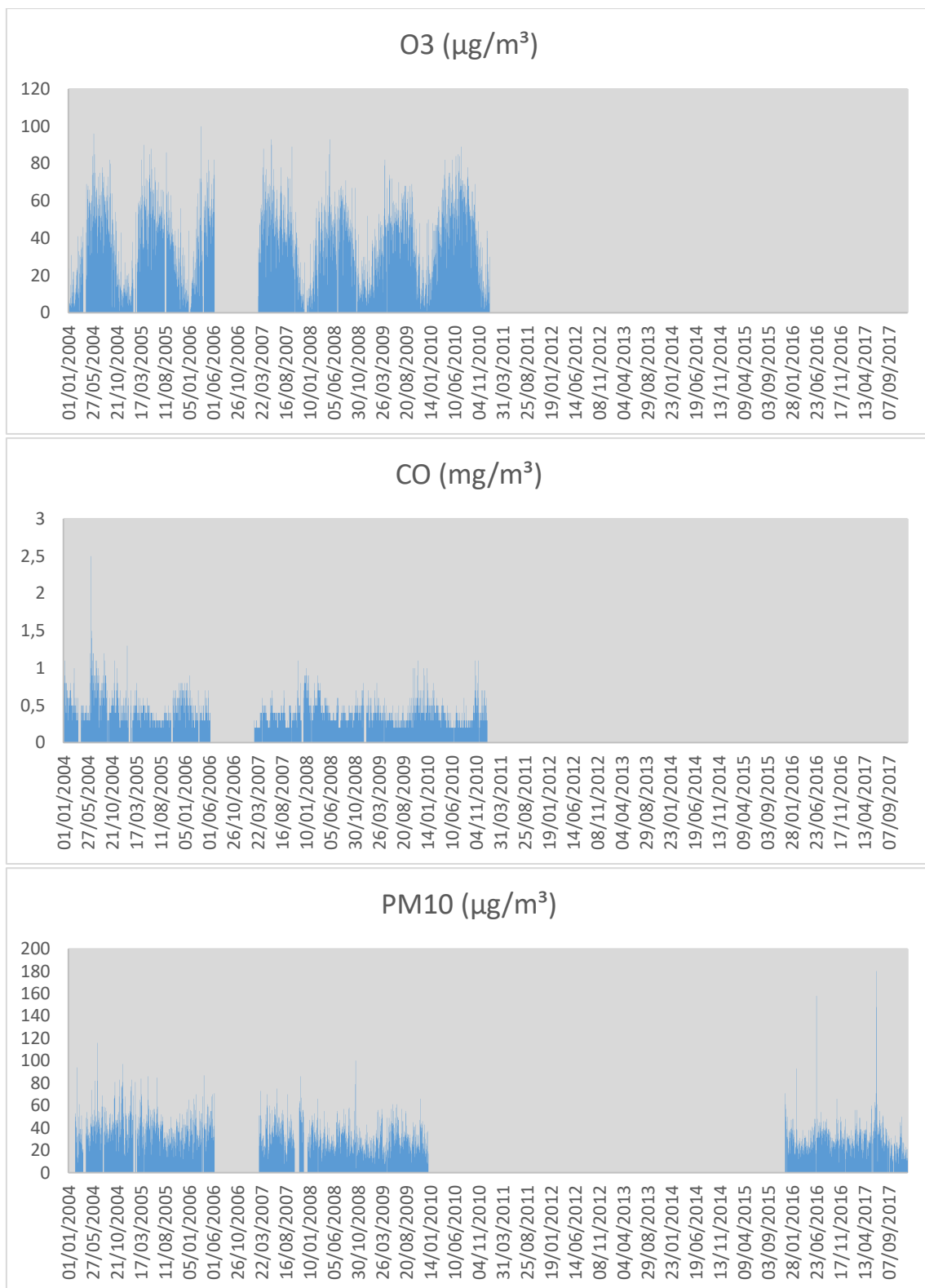
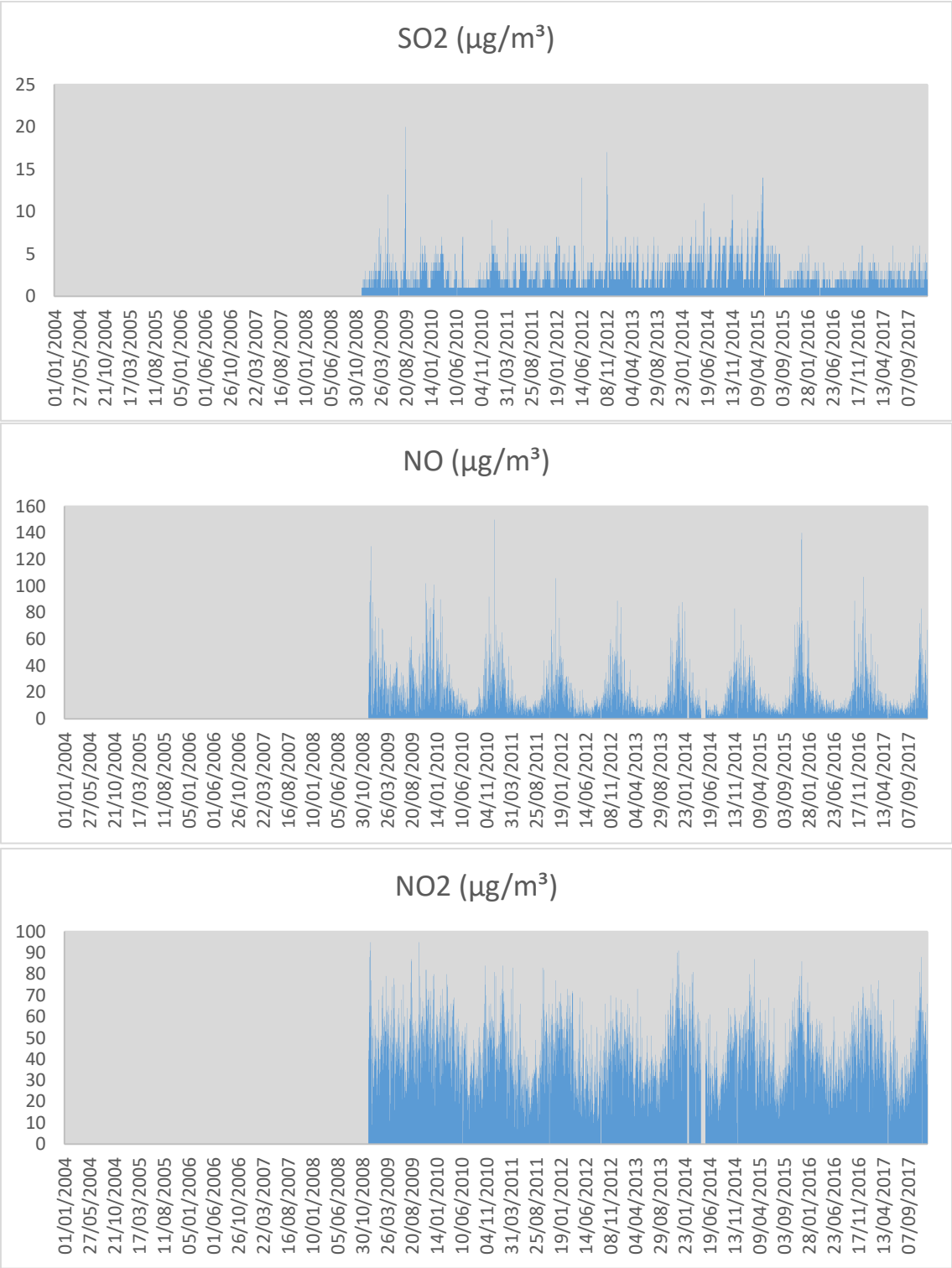


Figura 48. Tendencias de los contaminantes del aire.

Estación B14



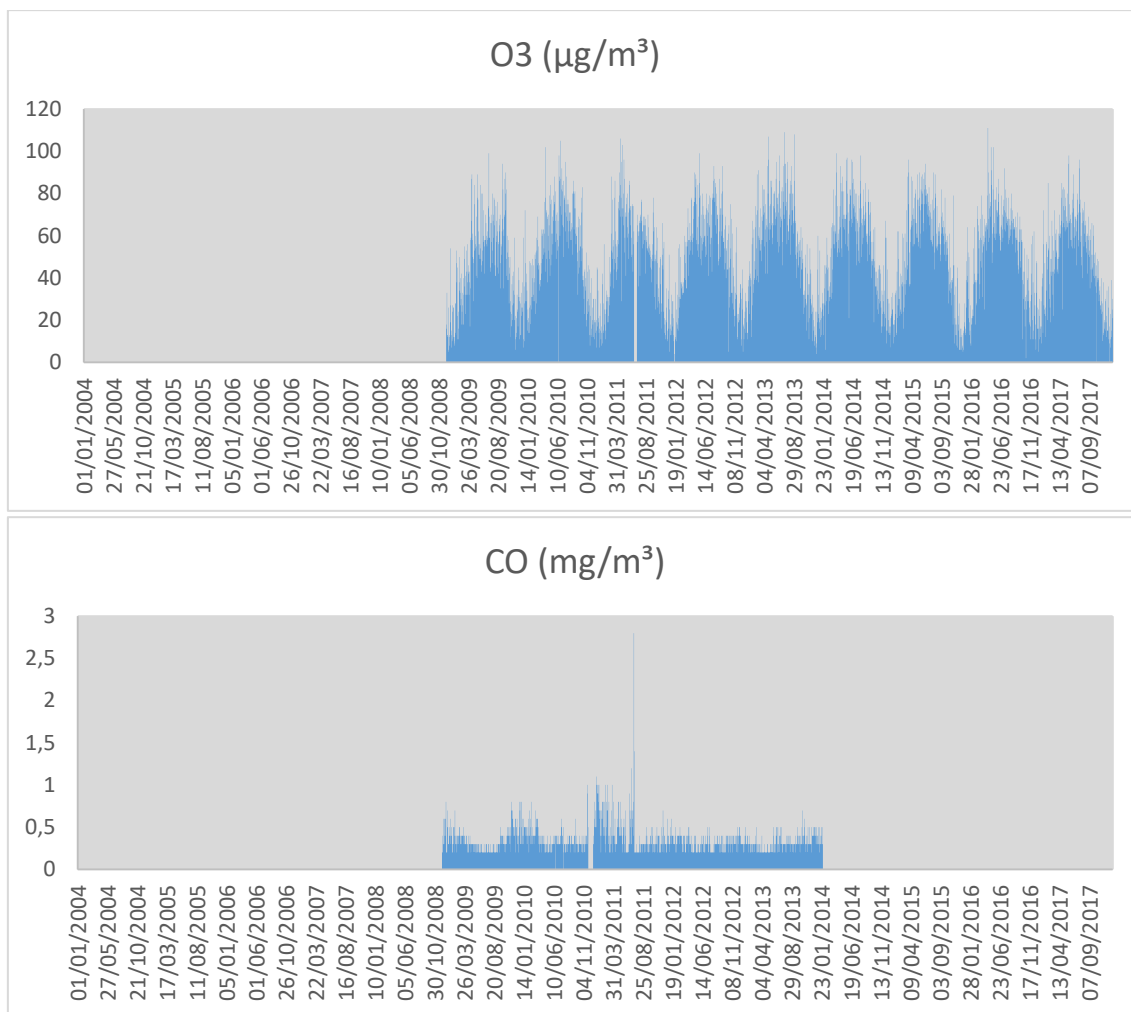
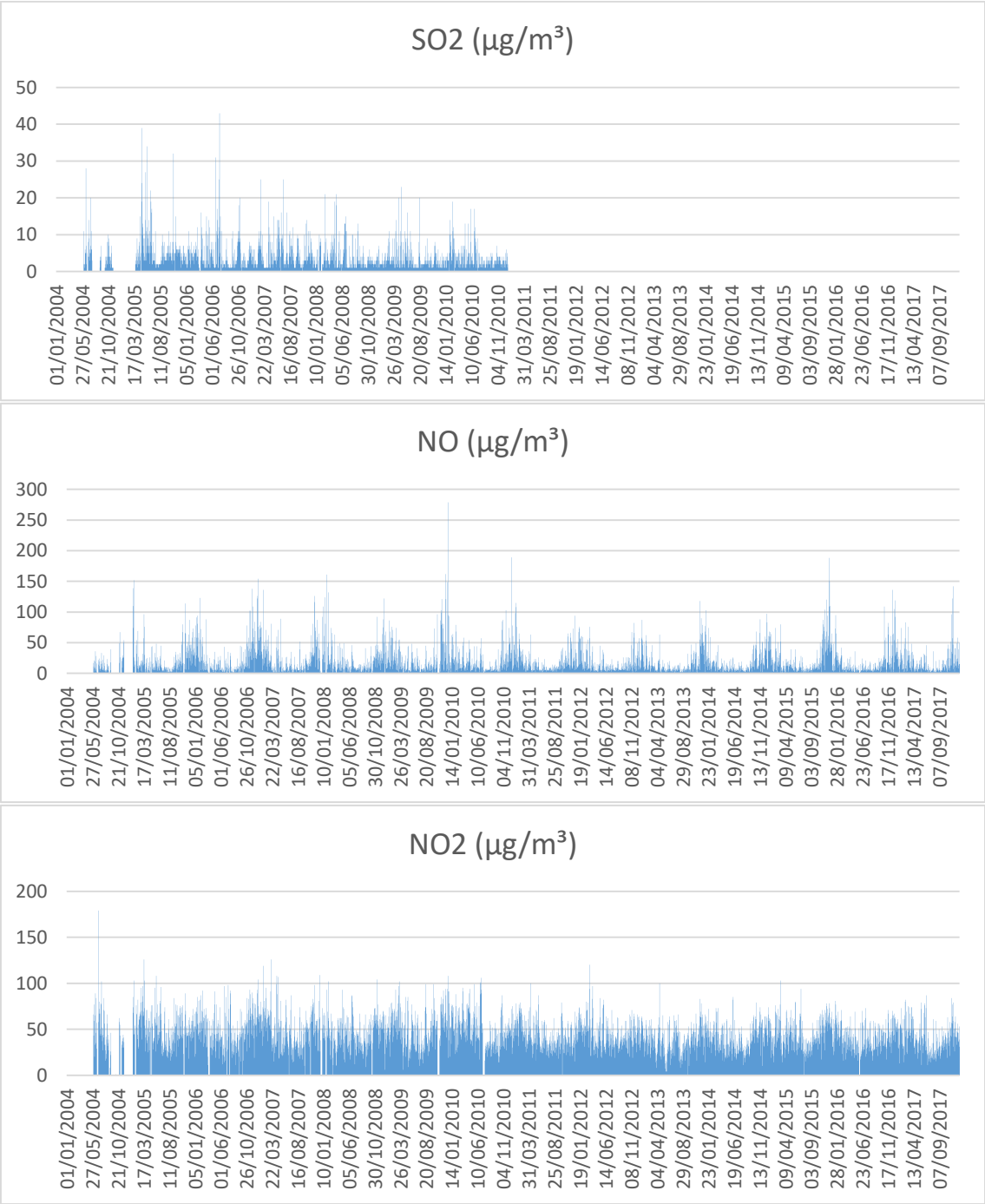


Figura 49. Tendencias de los contaminantes del aire.

Estación B17



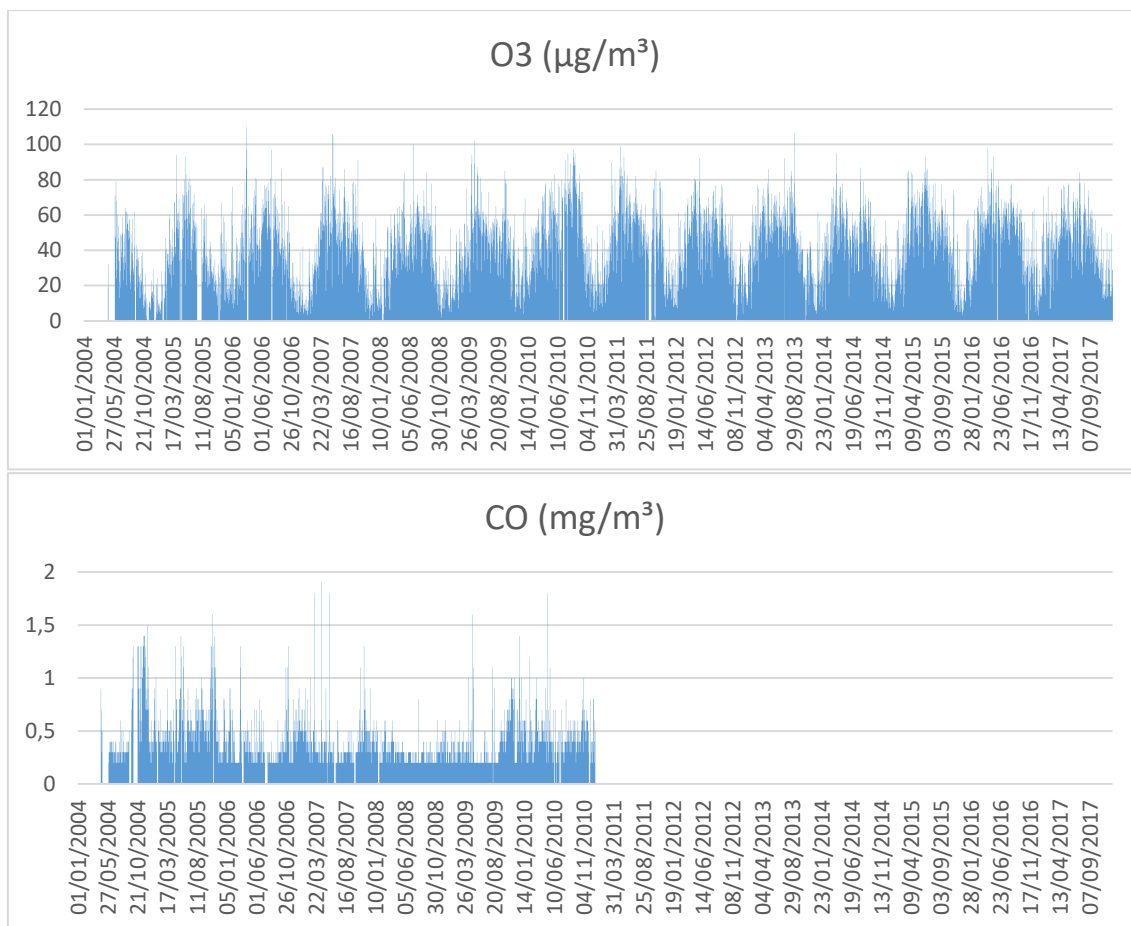
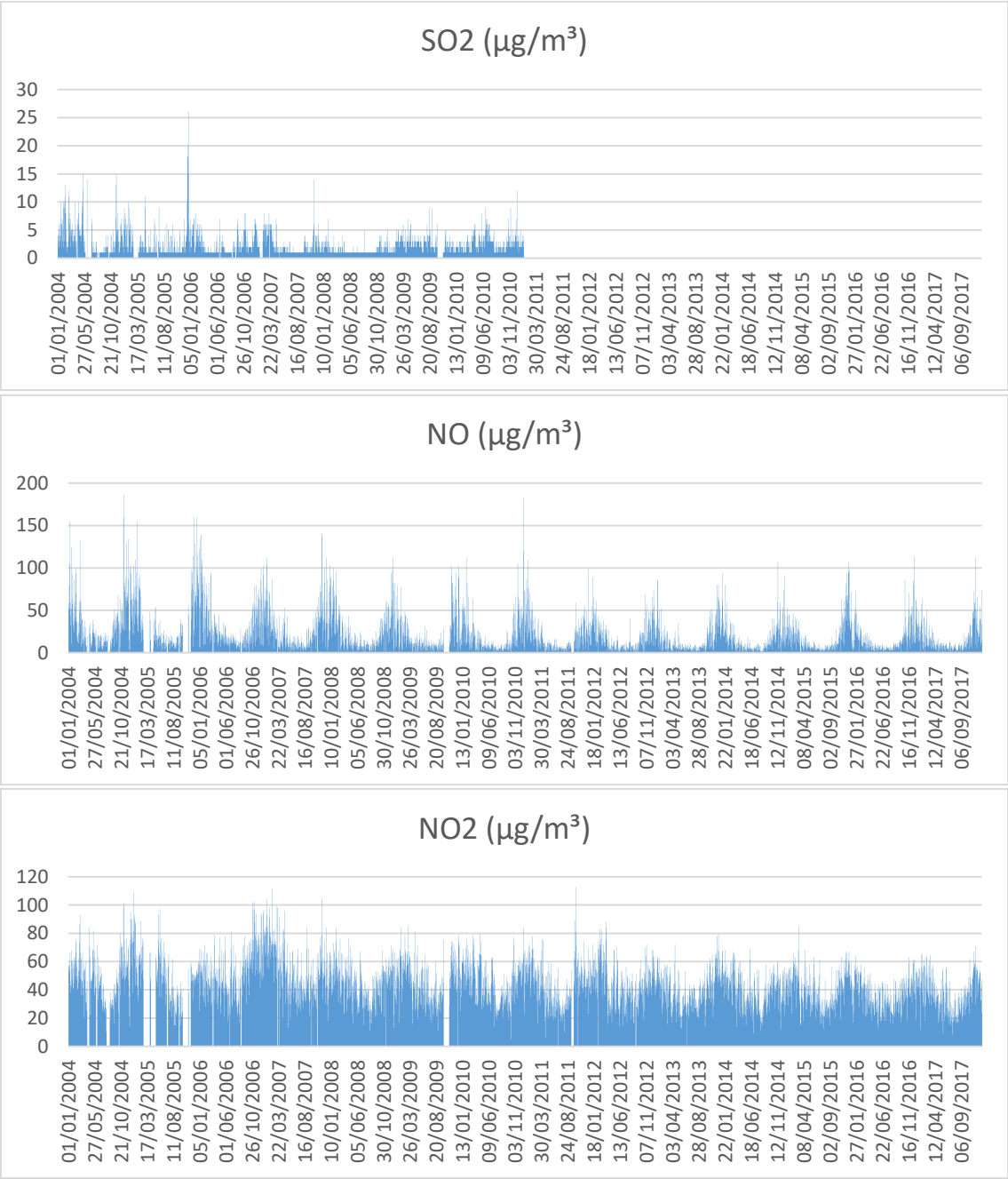


Figura 50. Tendencias de los contaminantes del aire.

Estación B13



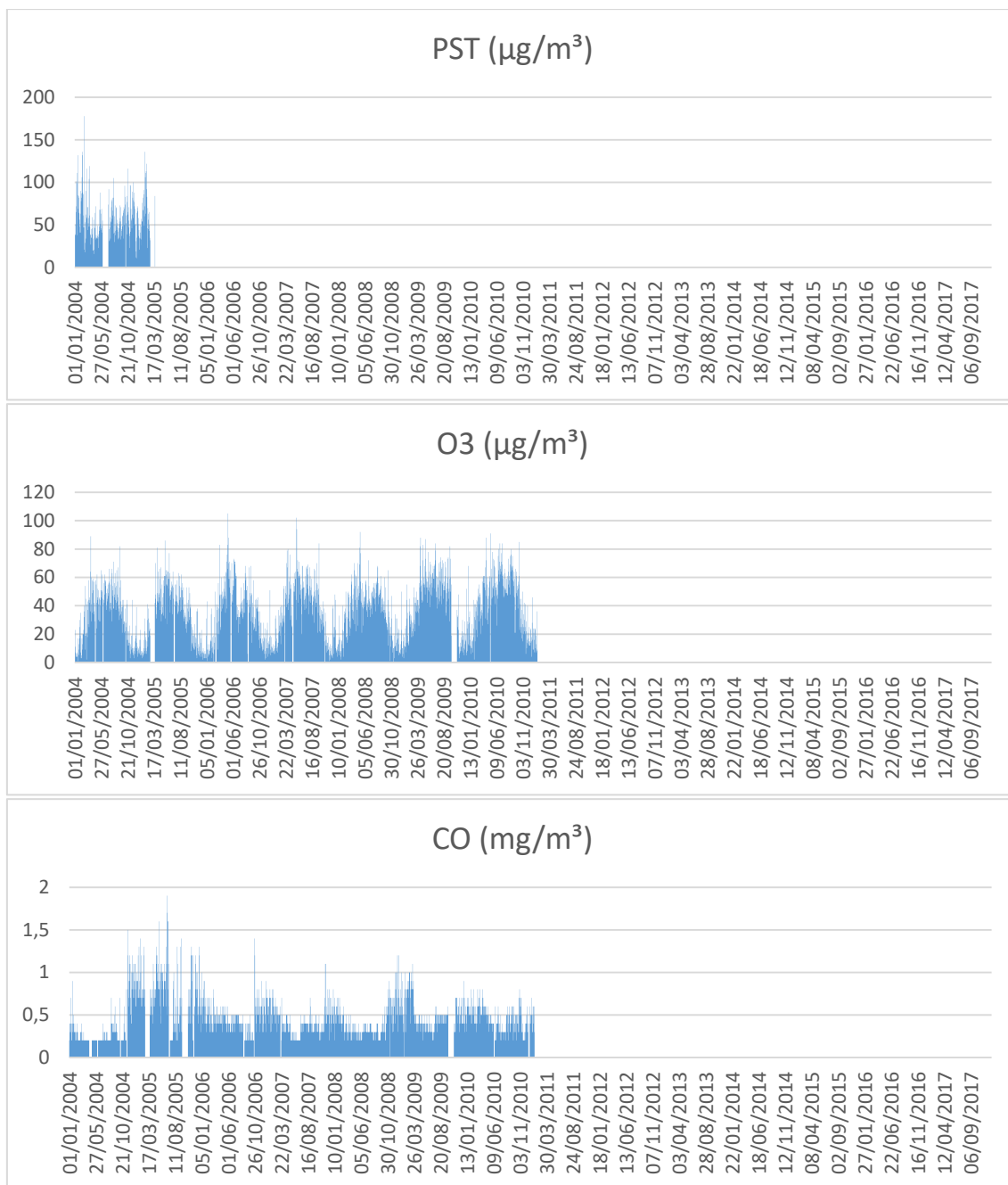
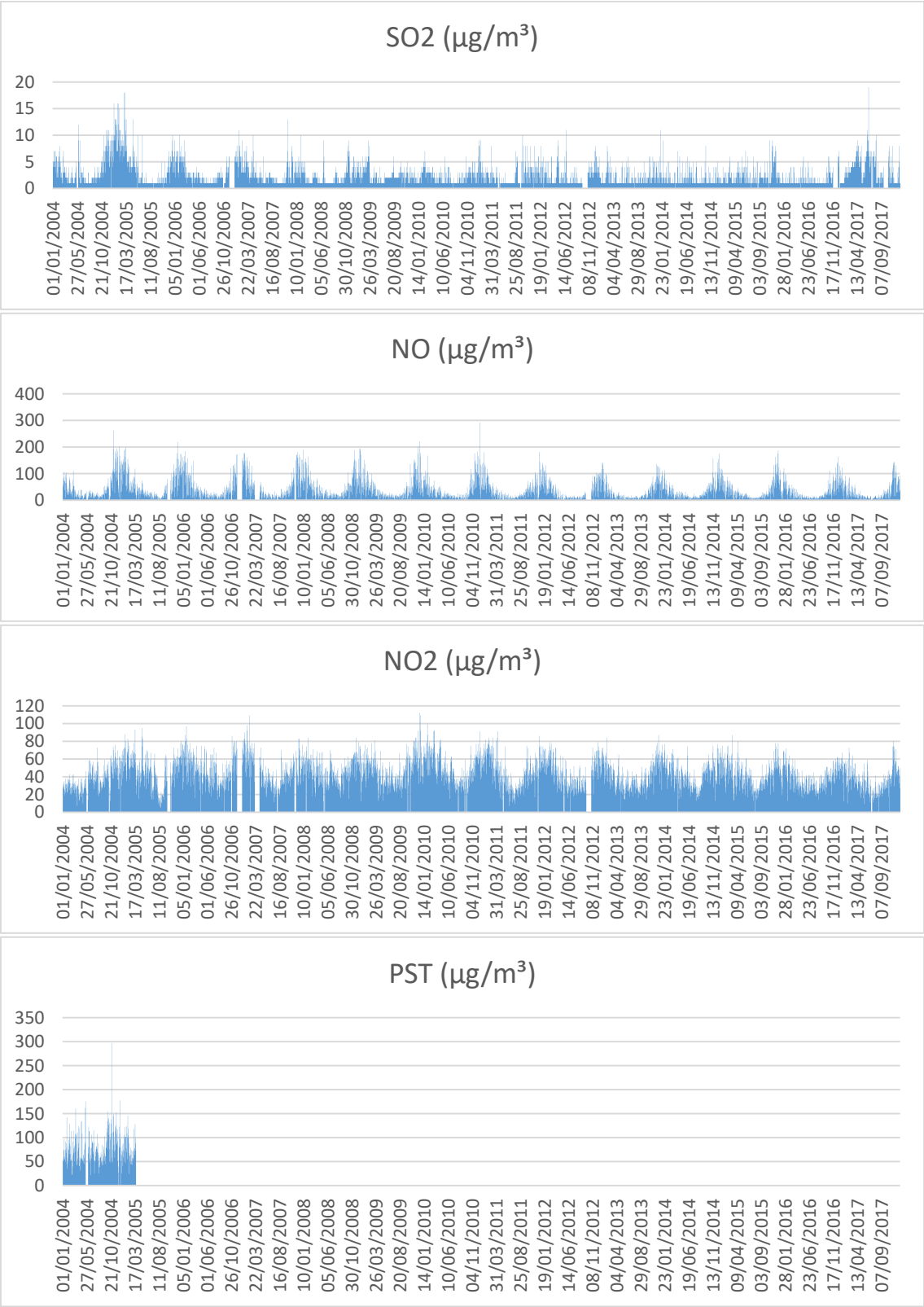


Figura 51. Tendencias de los contaminantes del aire.

Estación B12



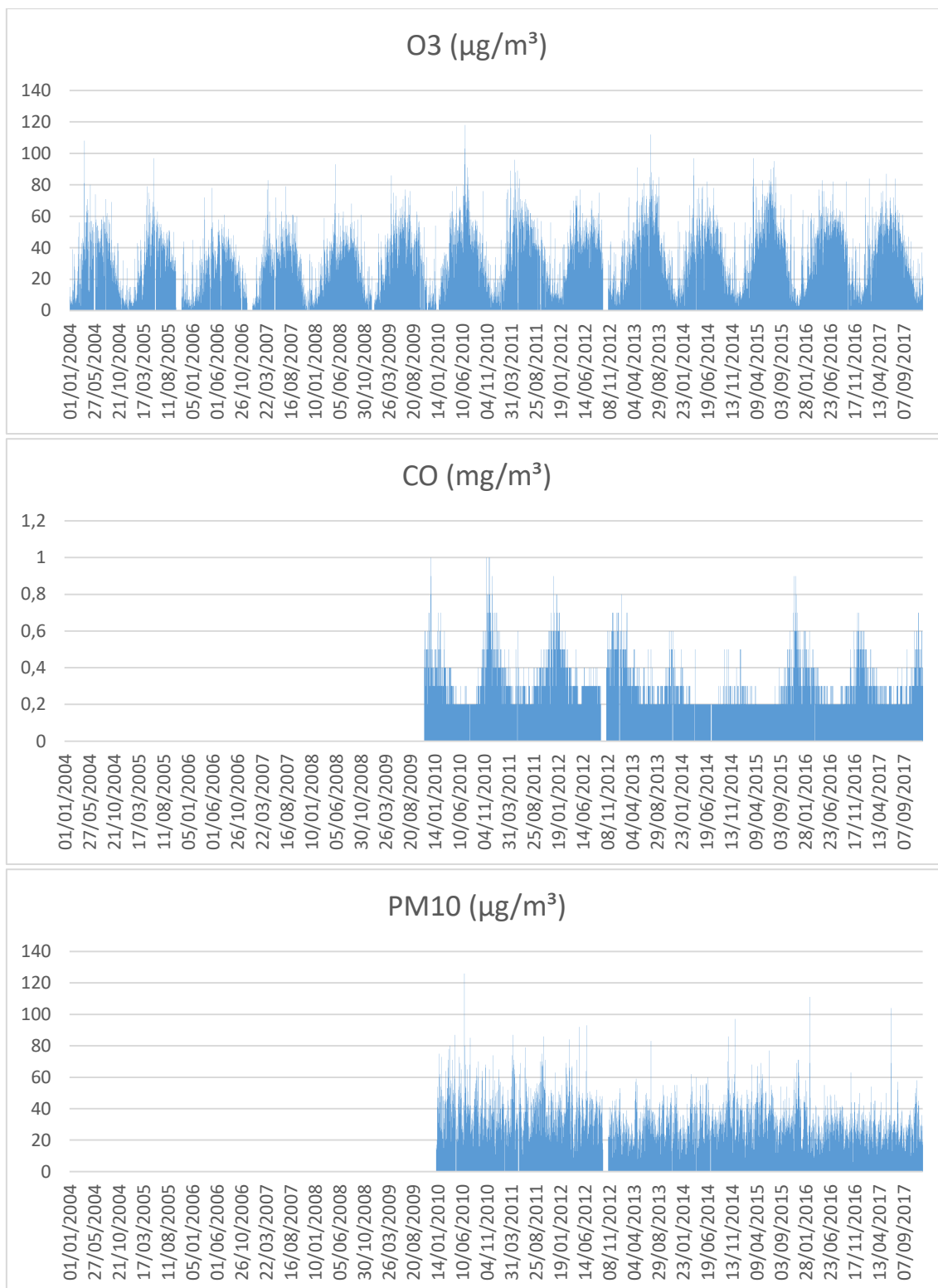


Figura 52. Tendencias de los contaminantes del aire.

ANEXO III: Análisis histórico y geográfico del estado trófico

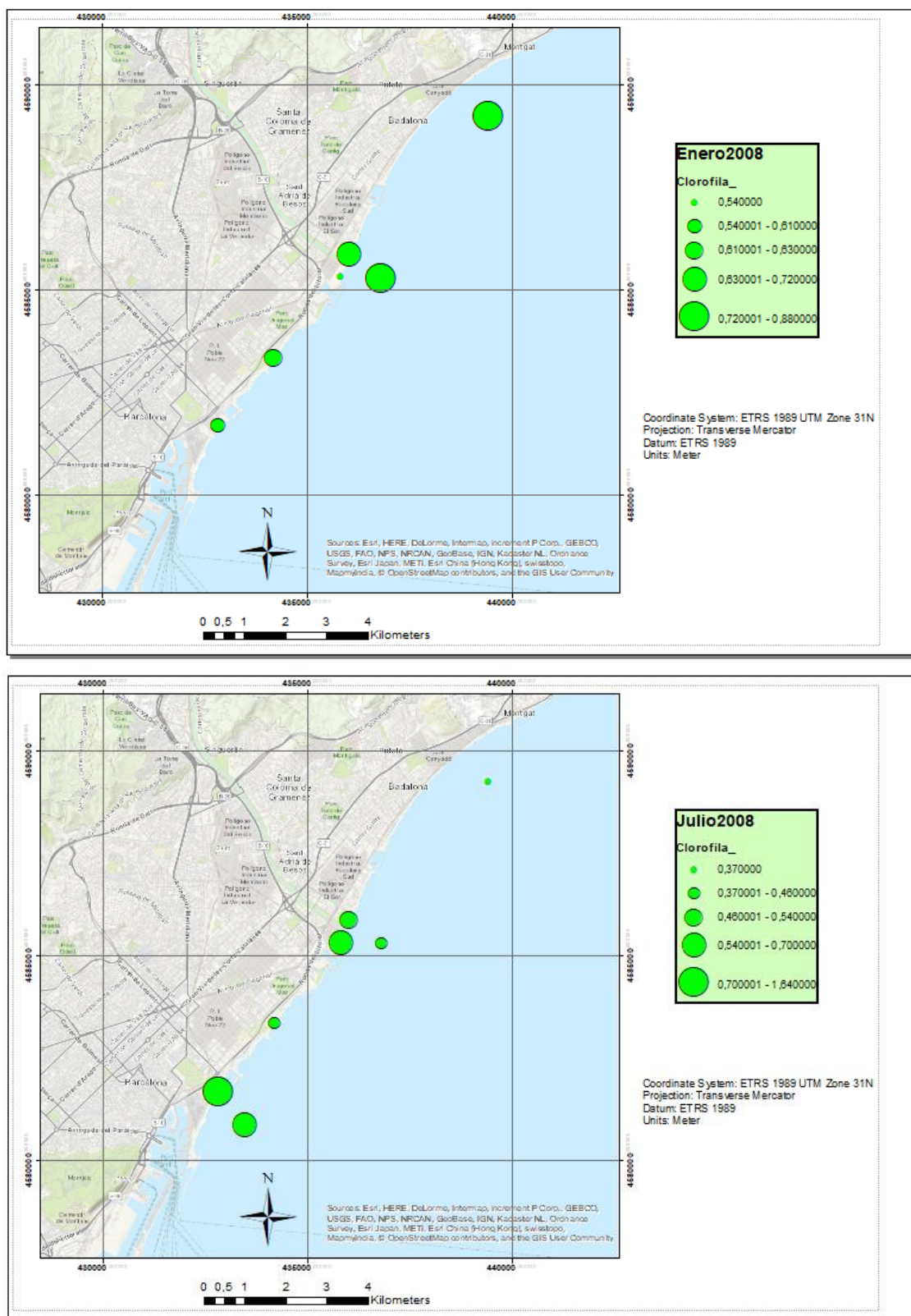


Figura 53. Análisis geográfico de las estaciones de la clorofila-a (mg/m3) en el año 2008.

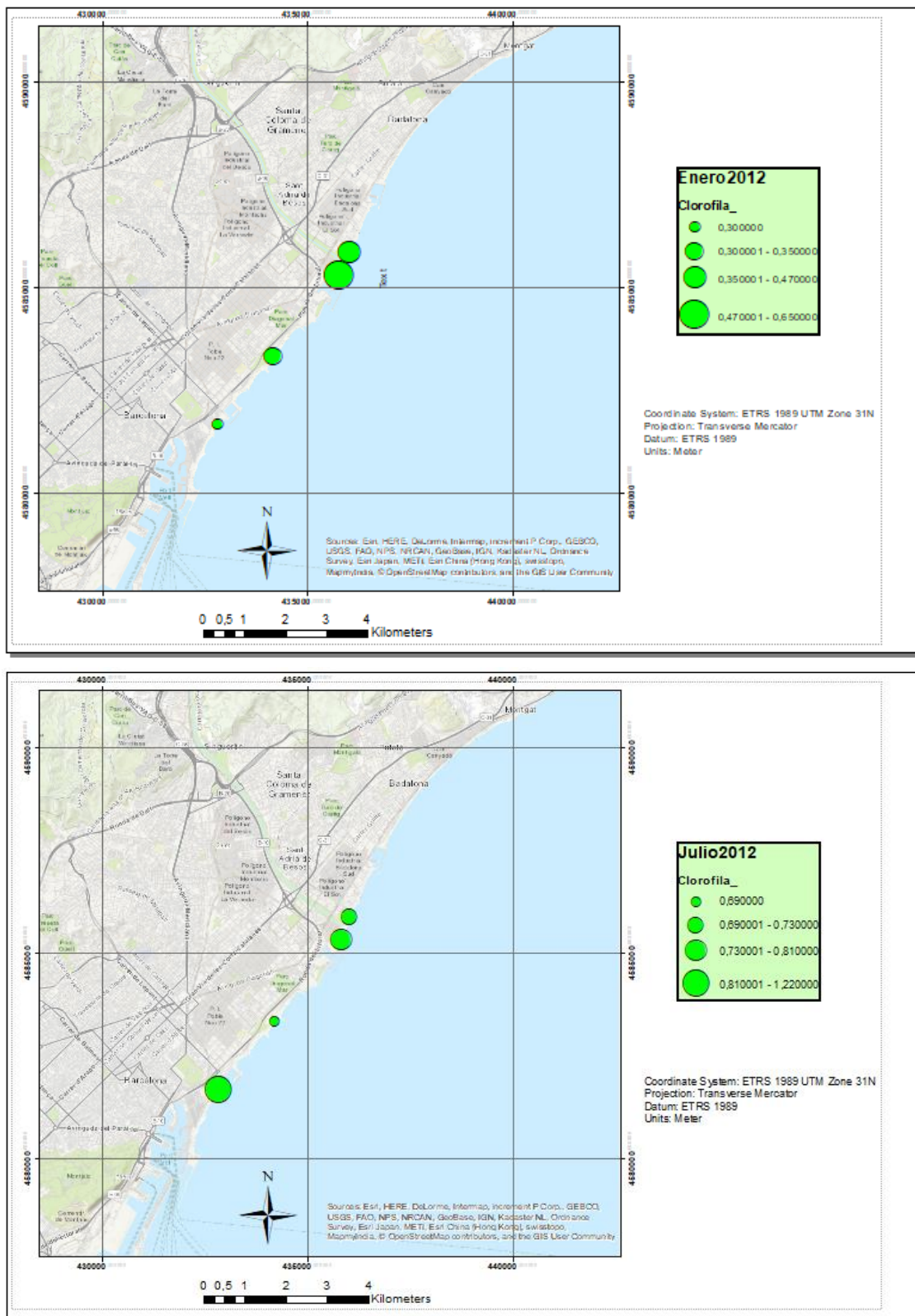


Figura 54. Análisis geográfico de las estaciones de la clorofila-a (mg/m³) en el año 2012.

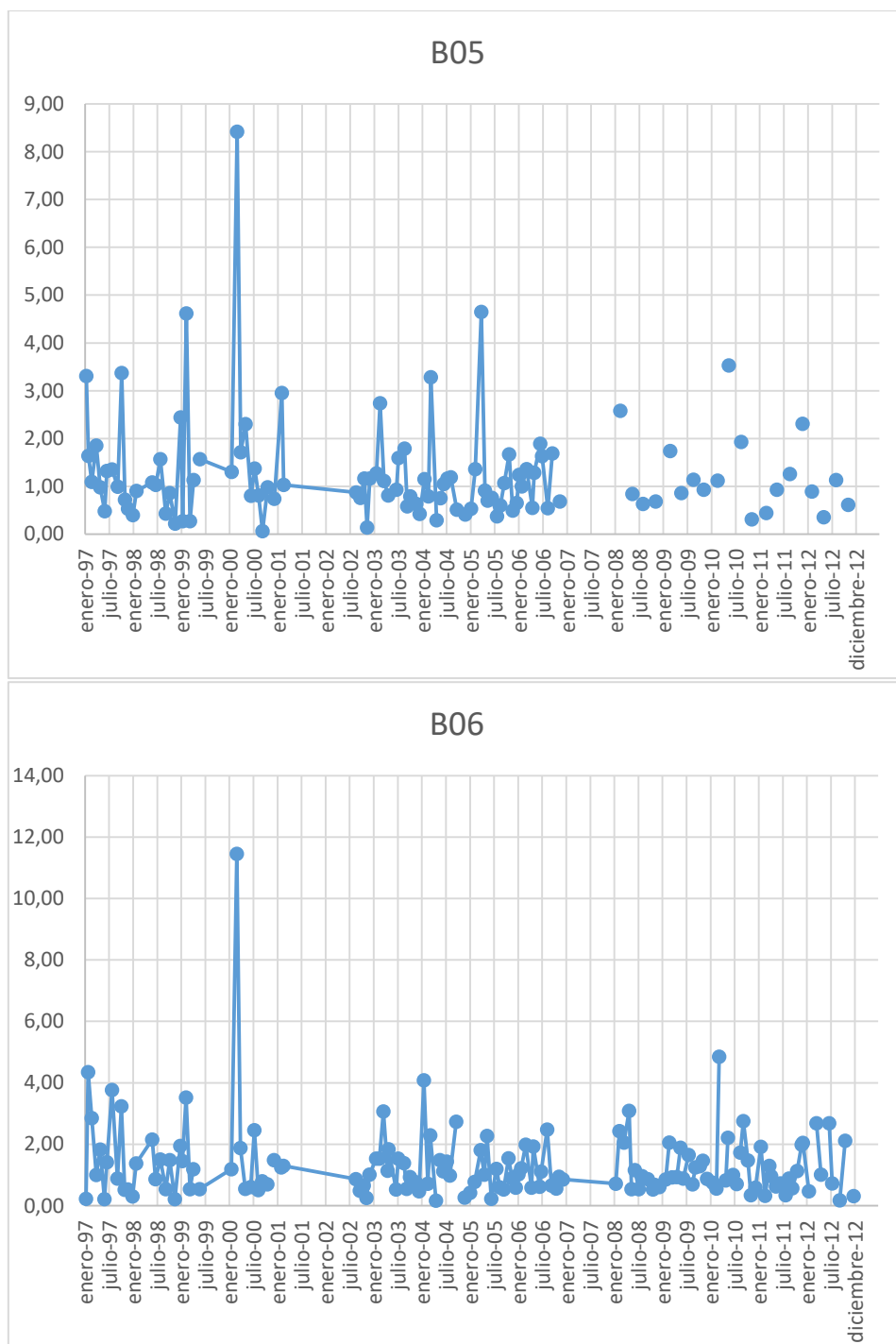


Figura 55. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m3)

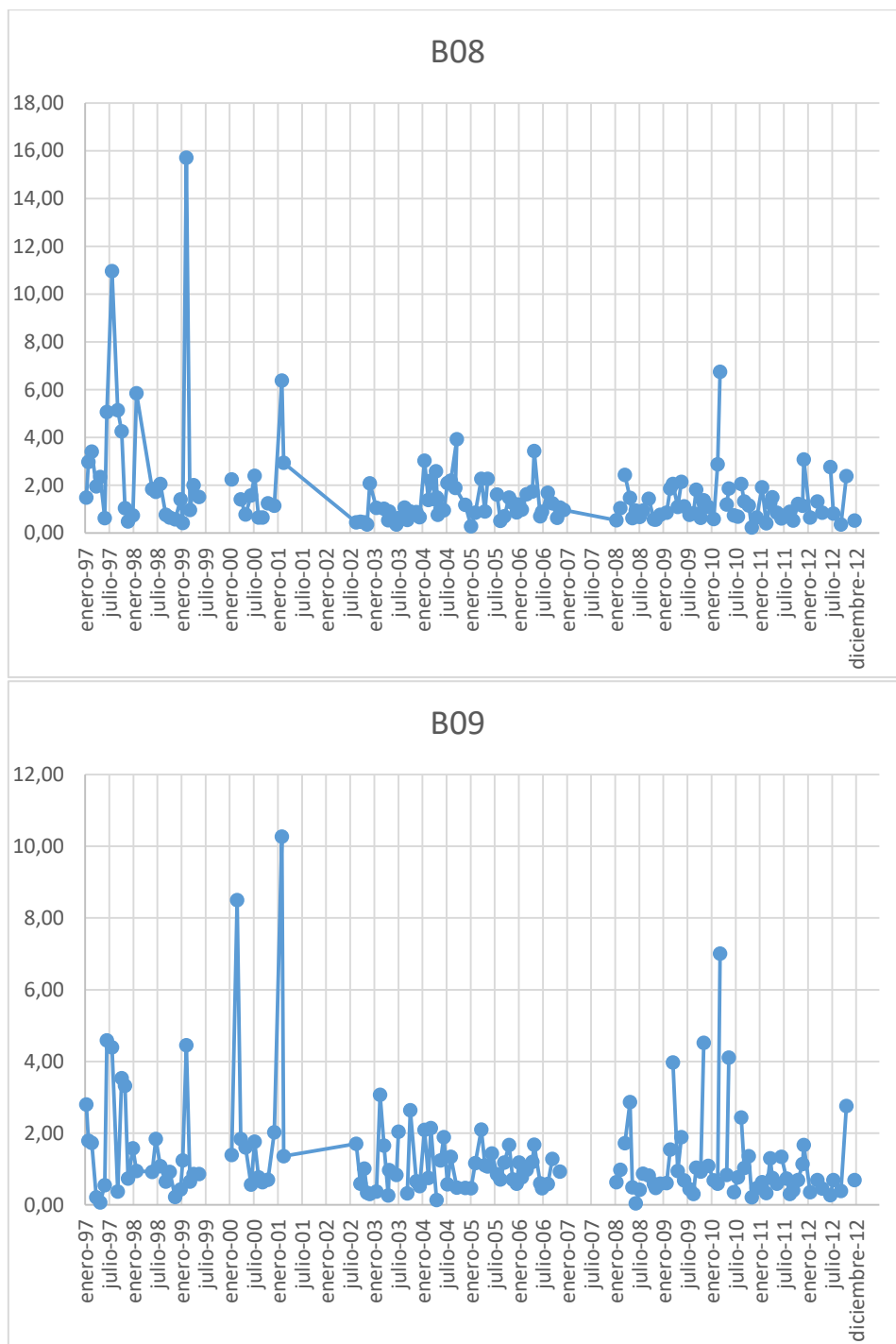


Figura 56. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m3).

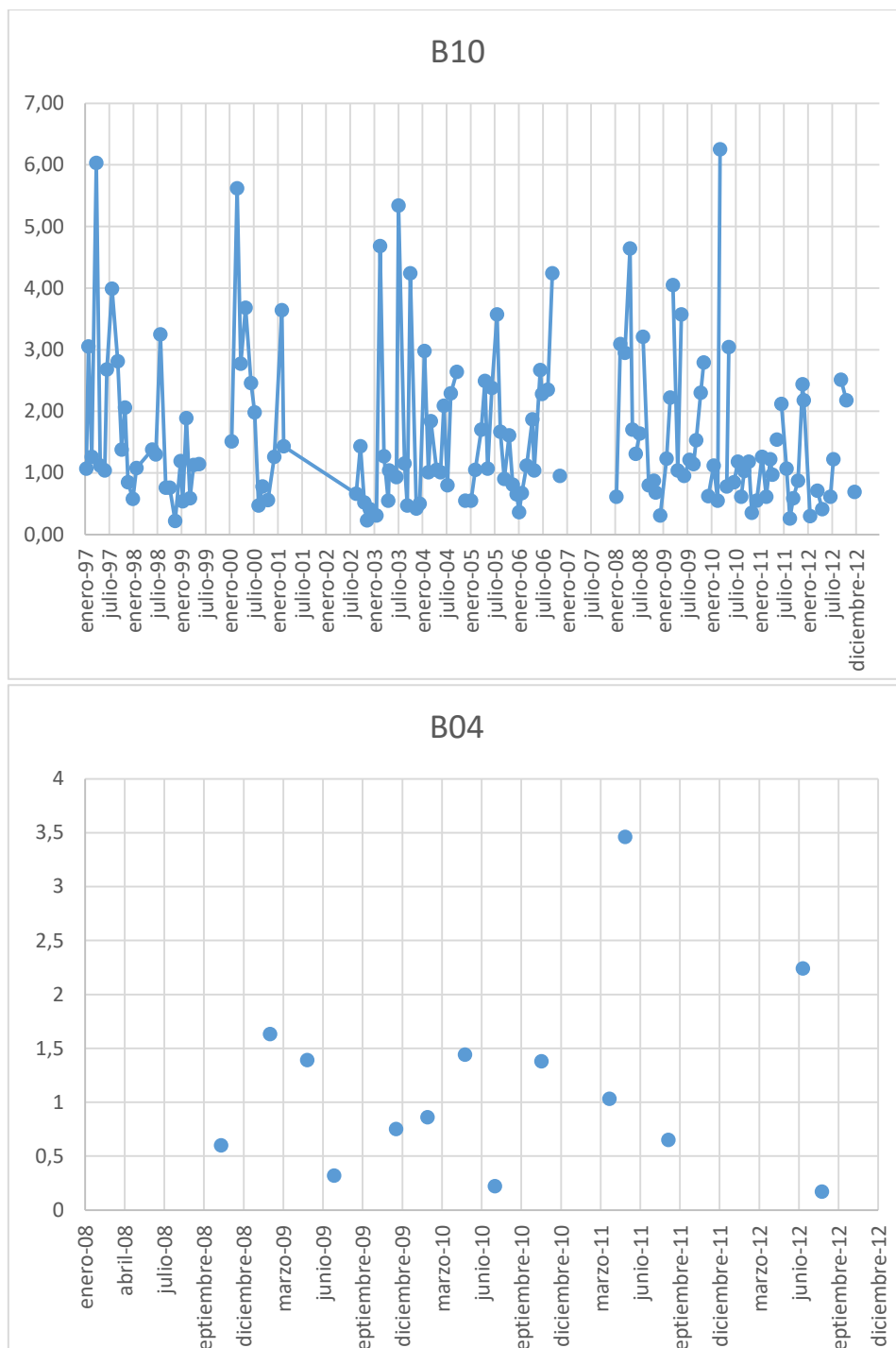


Figura 57.Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m3)

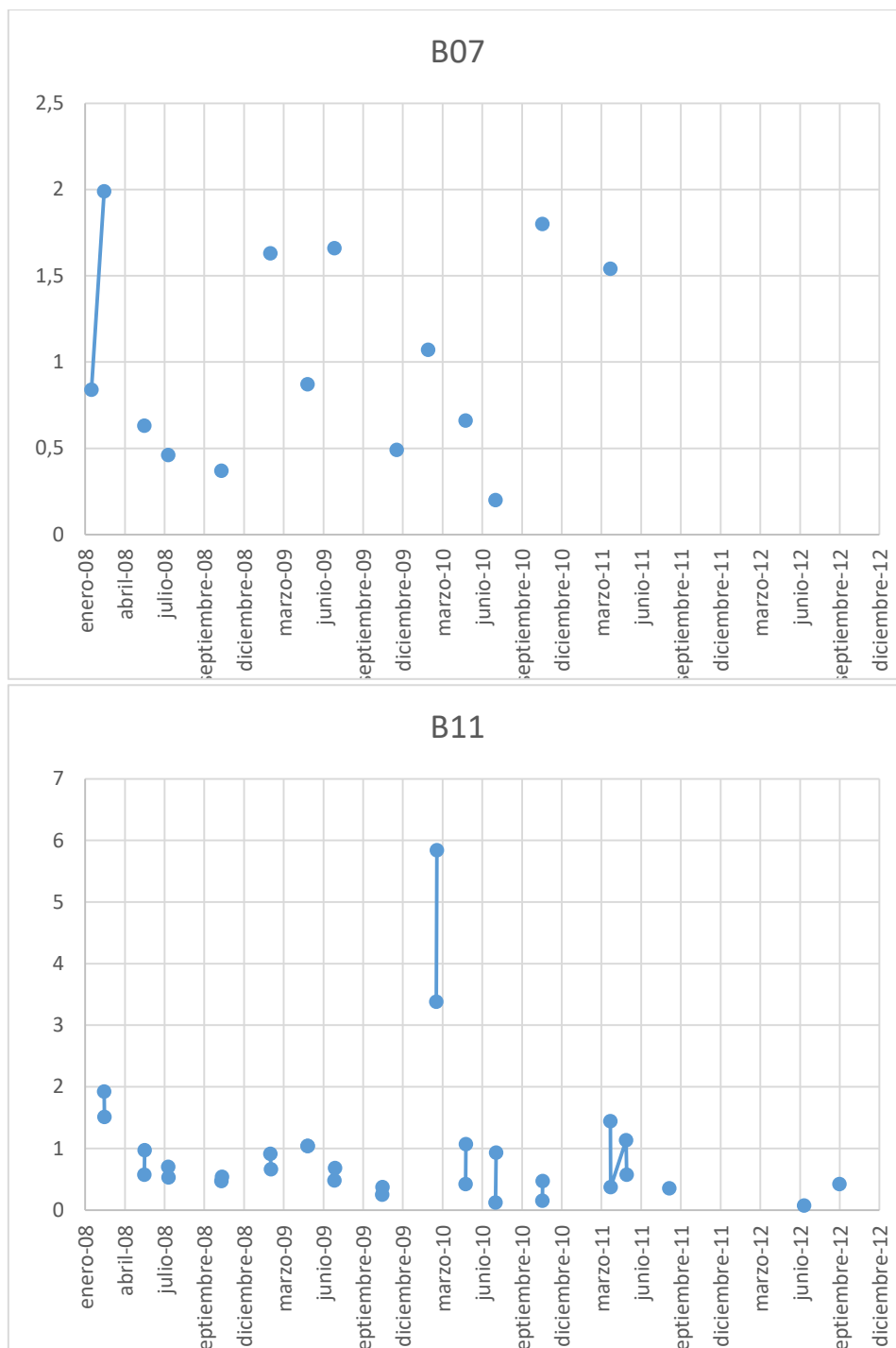


Figura 58. Tendencias de la concentración de clorofila-a (mg/m³)

ANEXO IV: Marco social del Besòs. Ciudad Jubilada.

El día a día de uno de los muchos jubilados que cultivan sus propios huertos en tierras residuales que no les pertenecen, entre los ríos, las autopistas o las vías de tren de la periferia de Barcelona como método de distracción, de relajación y de alejarse de la contaminada ciudad [x19]. Gente que nota que, con pequeños detalles como el cultivo, ya hace de por sí una limpieza de la zona del río a diferencia de la zona no cultivada en la que se ha podido ver contaminación incrementada por la sociedad ya que se crea un vertedero ilegal por la misma sociedad. En cambio, en el caso contrario, se ha visto a lo largo de los años que las zonas que se mantienen limpias, la sociedad las respetan. Además, se han llegado a utilizar los escombros que se abocaban en el borde del río para hacer un reúso de ello en el mismo cultivo. Ha habido gente que ha llevado 40 años con esta actividad de la que ha pasado de mano en mano y hasta momentos antes del proyecto del paseo fluvial, el ayuntamiento lo ha respetado.

Explorar y conocer estos huertos es un modo de aproximarse a una de las muchas prácticas autónomas que, desde su 'desobediencia', también dan forma a la ciudad contemporánea. Prácticas que, lejos de ser anecdóticas, nos dan muchas pistas sobre lo que ocurre detrás del supuesto orden urbano. El trabajo se centra en la dimensión social de estos huertos autoconstruidos, entendidos aquí como una lección de autonomía en una sociedad que insiste en asimilar 'Jubilación' a inutilidad y dependencia.

ANEXO V: Indicadores ambientales

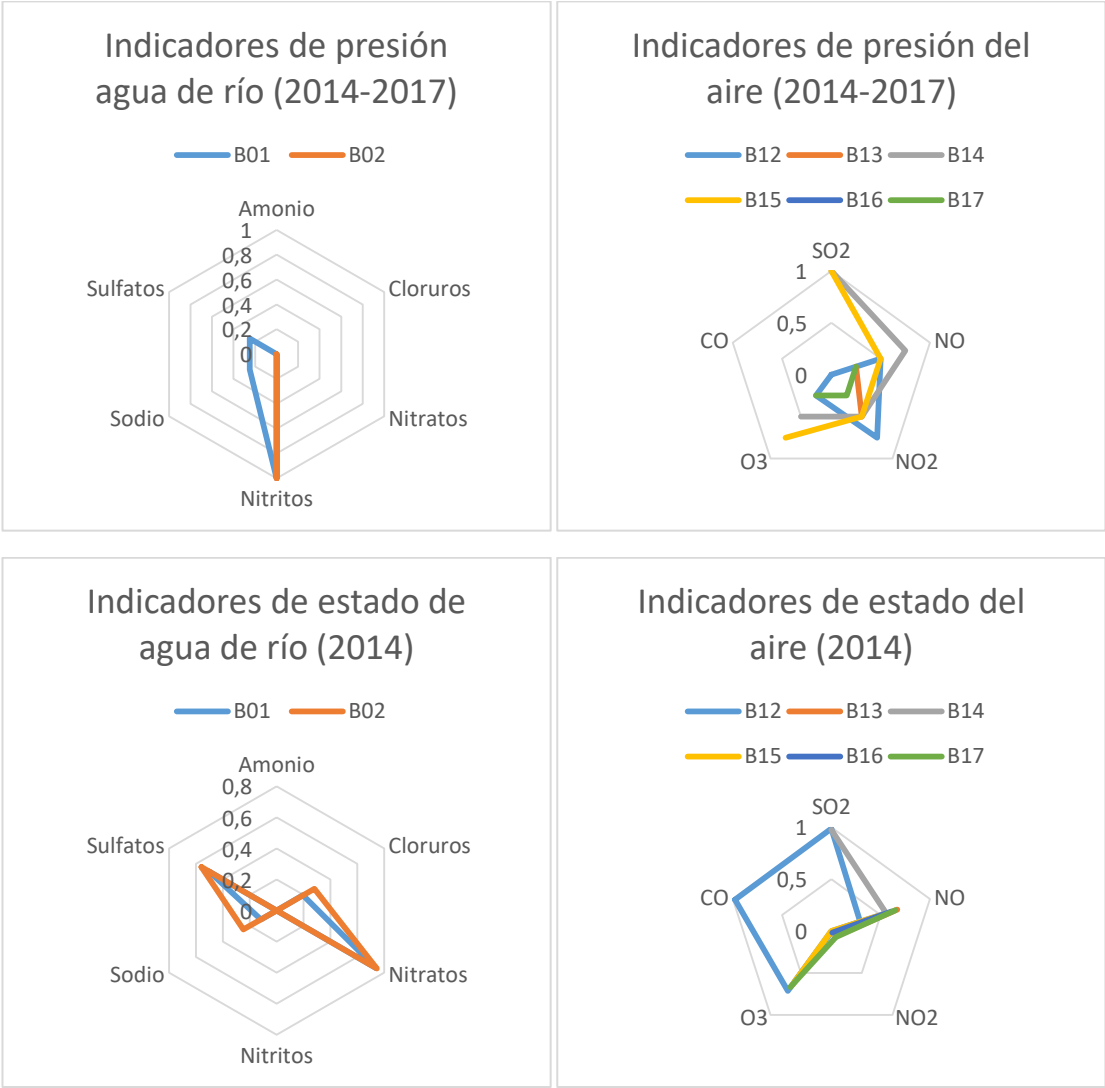


Figura 59. Resultados indicadores.

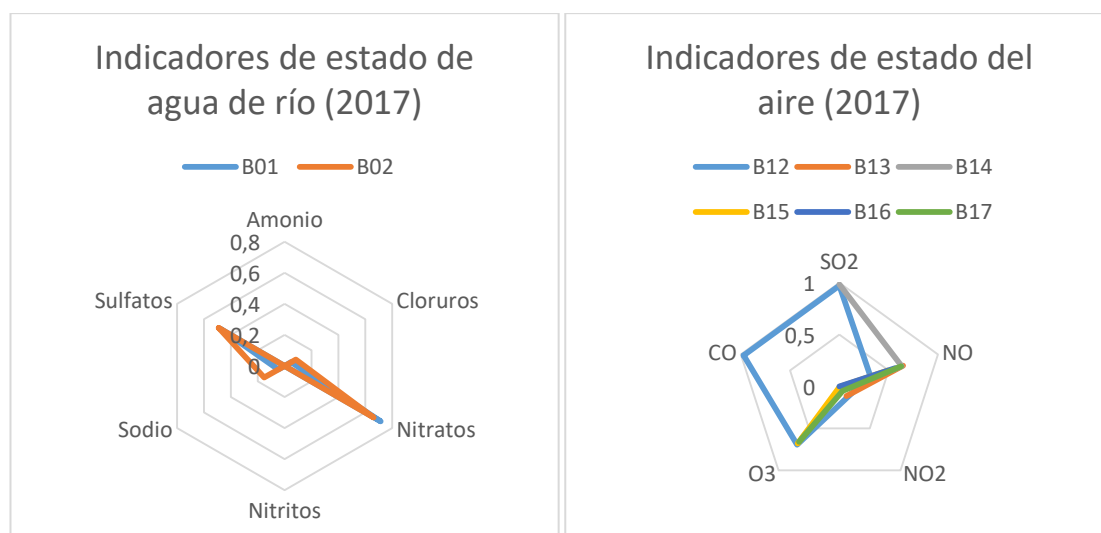


Figura 60. Resultados indicadores.

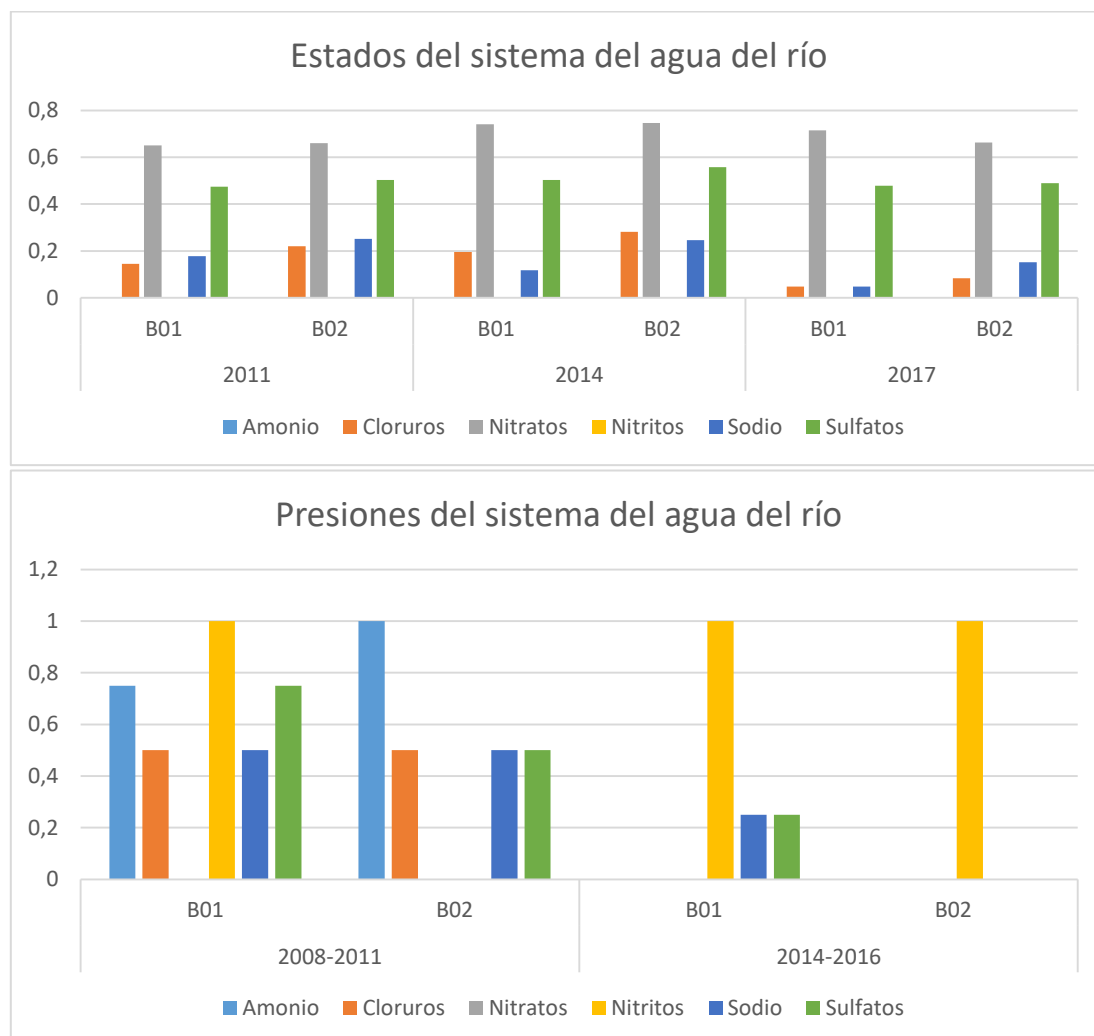


Figura 61. Resultados indicadores.

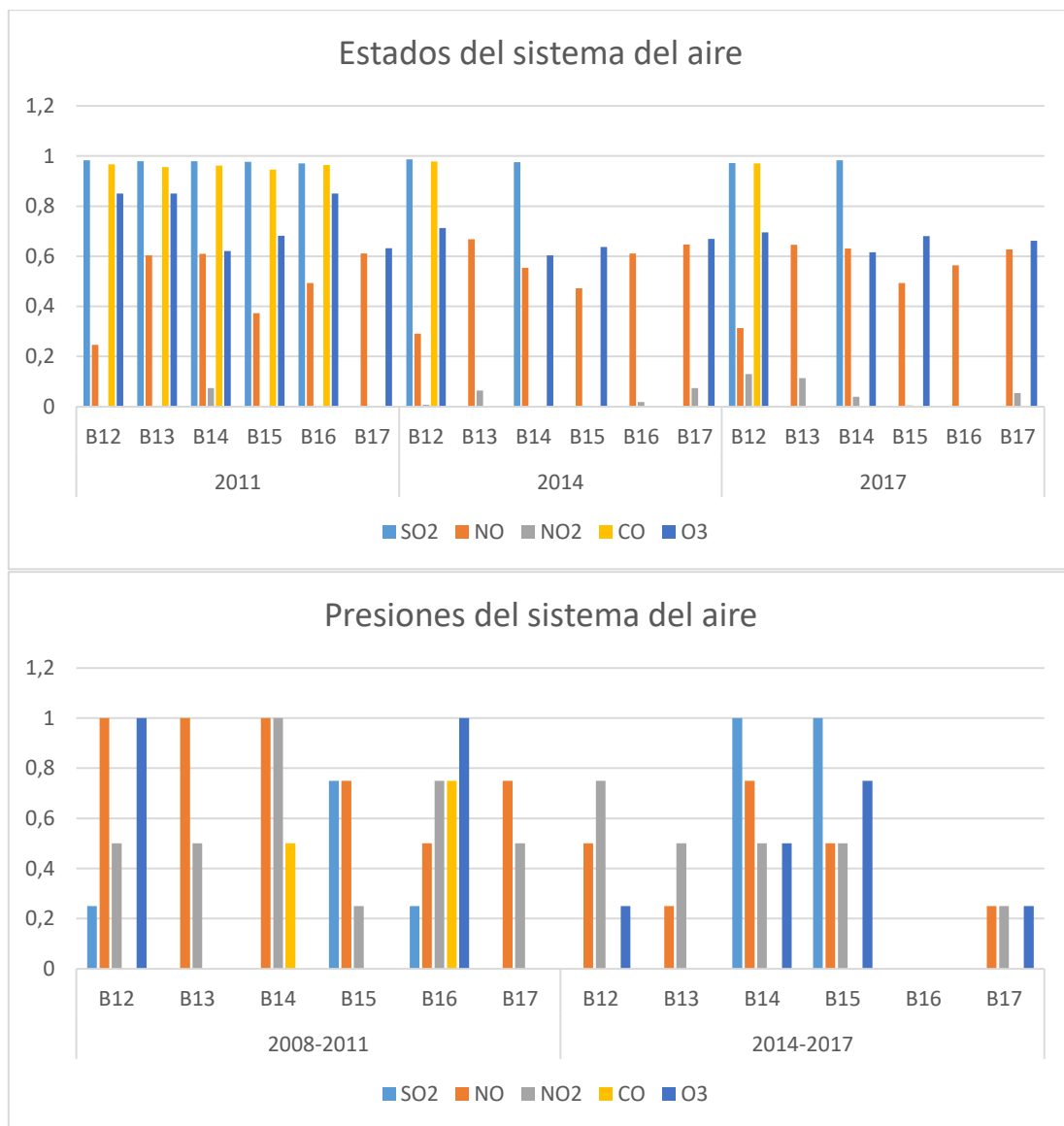


Figura 62.Resultados indicadores.